ISSN 0188-7297

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

SCT
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

Certificación ISO 9001:2008 ‡

REPARTO MODAL ÓPTIMO DEL TRANSPORTE TERRESTRE DE CARGA EN MÉXICO: SEGUNDA ETAPA

Eric Moreno Quintero
Óscar Rico Galeana
Agustín Bustos Rosales
Carlos Martner Peyrelongue
Ricardo Montoya Zamora

Publicación Técnica No. 435
Sanfandila, Qro., 2014

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Reparto modal óptimo del transporte terrestre de carga en México: segunda etapa

Publicación Técnica No. 435
Sanfandila, Qro., 2014

Este trabajo fue realizado por el Dr. Eric Moreno Quintero, el Mtro. Óscar Rico Galeana y el Dr. Agustín Bustos Rosales, investigadores de la Coordinación de Integración del Transporte del Instituto Mexicano del Transporte, con la supervisión y observaciones del Dr. Carlos Martner, Coordinador.

Se contó con la participación del Dr. Ricardo Montoya Zamora, quien desarrolló las rutinas de TransCAD para la modelación y análisis, así como los primeros ensayos de migración del modelo al software VISUM.

Contenido

Resumen		iii
Abstract		v
Resumen	ejecutivo	vii
Capítulo 1.	Introducción	1
Capítulo 2.	Diagnóstico de desempeño del modelo en la primera etapa	3
	2.1 Primeros resultados del modelo	3
	2.2 Análisis de flujos observados y flujos pronosticados	14
Capítulo 3.	Reparto modal carretera-ferrocarril en otros países	19
	3.1 Situación en EE. UU.	19
	3.2 Situación en Canadá	22
	3.3 Situación en Europa	25
	3.4 Consideraciones sobre el reparto modal carretera-ferrocarril	30
Capítulo 4.	Modelación de escenarios con el modelo ajustado	35
	4.1 Modelado de las redes unimodales	35
	4.2 Modelado de la red bimodal	38
Capítulo 5.	Conclusiones y trabajo futuro	43
Bibliografía		51

Resumen

Este trabajo corresponde a la segunda etapa del estudio sobre reparto modal óptimo del transporte terrestre de carga en México, realizado por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) en 2014 y que se presentó en la Publicación Técnica No. 413 de ese año.

El objetivo de esta segunda parte es analizar con mayor detalle los resultados de la primera etapa del estudio, a fin de mejorar el desempeño del modelo construido, así como obtener datos más recientes para hacer estimaciones de las asignaciones de los movimientos de carga en la red bimodal carretera-ferrocarril que se desarrolló en la primera etapa.

Luego de describir los antecedentes del estudio de reparto modal en el capítulo 1 de introducción, en el capítulo 2 se presenta un diagnóstico del desempeño del modelo construido en la primera etapa, en el cual se examinan los resultados obtenidos en los escenarios de asignación elegidos, estimando la precisión de estos resultados con procedimientos de comparación de los flujos pronosticados en el modelo contra flujos estimados de información de datos viales. Asimismo, se examina la consistencia de las matrices OD utilizadas, y se verifica de manera más detallada la conexidad de la red bimodal construida en la primera etapa.

En el capítulo 3 se revisa el indicador de reparto modal carretera-ferrocarril en otros países: Estados Unidos, Canadá y la Unión Europea, para tener una panorámica del comportamiento de este indicador en países industrializados, y se analizan los aspectos determinantes de la elección de modo en este contexto.

El capítulo 4 muestra resultados del modelo ya ajustado en dos escenarios básicos de la red bimodal. Primeramente se muestran los resultados para las redes carretera y ferroviaria operando separadamente, sin posibilidad de transferir carga entre ellas. Luego, se muestran los resultados con la red bimodal tanto para el caso en que no hay transferencia de carga como para el caso en que sí es posible transferir carga entre los modos. Los resultados obtenidos son consistentes con el criterio de los tiempos de recorrido en las distintas redes, en los cuales se consideró la modelación de congestión en la red carretera.

Finalmente, en el capítulo 5 se resumen las conclusiones principales del trabajo, y se señalan algunas recomendaciones y posibilidades de trabajo futuro en el tema.

Abstract

This work is the second stage of the study on optimal modal distribution of land freight transport in Mexico, developed by the Mexican Institute of Transport *(*IMT) in 2014 and published under Technical Publication number 413 in that year.

The aim of this second part is to analyse in more detail the results of the first stage of the study, in order to improve the performance of the model developed and to gather more recent data to estimate assignments of cargo movements along the bimodal road-rail network developed on the first stage.

After describing the background to the study of modal split in chapter 1 with an introduction, Chapter 2 shows a performance diagnosis of the model developed over the first stage, in which the results of the chosen assignment scenarios are examined, by estimating the accuracy of these results comparing the predicted flows in the model against data estimated from road counts. Also, the consistency of the OD matrices used is examined and the connectedness of the bimodal network built on the first stage is examined with more detail.

In chapter 3 the road-rail modal share indicator in other countries is reviewed: United States, Canada and the European Union, in order to get an overview of the behaviour of this indicator in industrialized countries. The determinant for modal choice is examined in this context as well.

Chapter 4 shows results with the adjusted model in two basic scenarios on the bimodal network. Firstly results are shown for the highway network and the rail network separately, without cargo transfer between both networks. Then, results on the bimodal network are shown, both without cargo transfer and when cargo transfer is allowed. The results obtained are consistent with the travel time criterion used in modelling, including congestion aspects of highway flows.

Finally, Chapter 5 summarizes the main conclusions, pointing out some recommendations and prospects for future work on the subject.

Resumen ejecutivo

En esta segunda etapa de modelación del reparto modal óptimo del transporte terrestre de carga en México se han examinado las bases y supuestos sobre los que se construyó el modelo de asignación desarrollado en la primera etapa de modelación.

Luego de la Introducción en el capítulo 1, en el que se resumen los objetivos del trabajo, el capítulo 2 presenta un diagnóstico, que permite revisar la construcción de la red bimodal, la cual representa de modo único las redes carretera federal y ferroviaria en un nivel de detalle adecuado para modelar el transporte interurbano de carga. La conexión entre el modo carretero y el ferroviario se hizo considerando las estaciones y las terminales de transferencia identificadas en el sistema ferroviario nacional, y la conectividad de la red bimodal se verificó con varios procedimientos disponibles en el software TransCAD. En particular, se pudo verificar la generación de rutas más cortas entre nodos origen en la red carretera (o ferroviaria) y nodos destino en la red ferroviaria (o carretera), con lo que se asegura la posibilidad de flujo de carga entre ambas redes y en cualquier sentido: carretera-ferrocarril, y viceversa.

En el modelo de asignación se utilizó la función BPR para la parte carretera con los parámetros α y β propuestos en la primera etapa del proyecto, con una variación en los valores según el tipo de camino, y la asignación “todo-o-nada” para la red ferroviaria, dadas las características de flujos controlados en ese modo de transporte. Para el modelo de asignación se emplearon matrices O-D iniciales en ambos modos. Para el modo carretero se inició con una matriz semilla O-D, basada en encuestas origen-destino de 2010 y años previos.

Los primeros resultados del modelo de asignación con la matriz semilla del modo carretero se compararon con los flujos estimados a partir de conteos del tránsito diario promedio anual (TDPA) que publica la Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Esta comparación pudo desglosarse en los cinco tipos vehiculares dominantes en el movimiento de carga carretero: C2, C3, T3S2, T3S3 y T3S2R4.

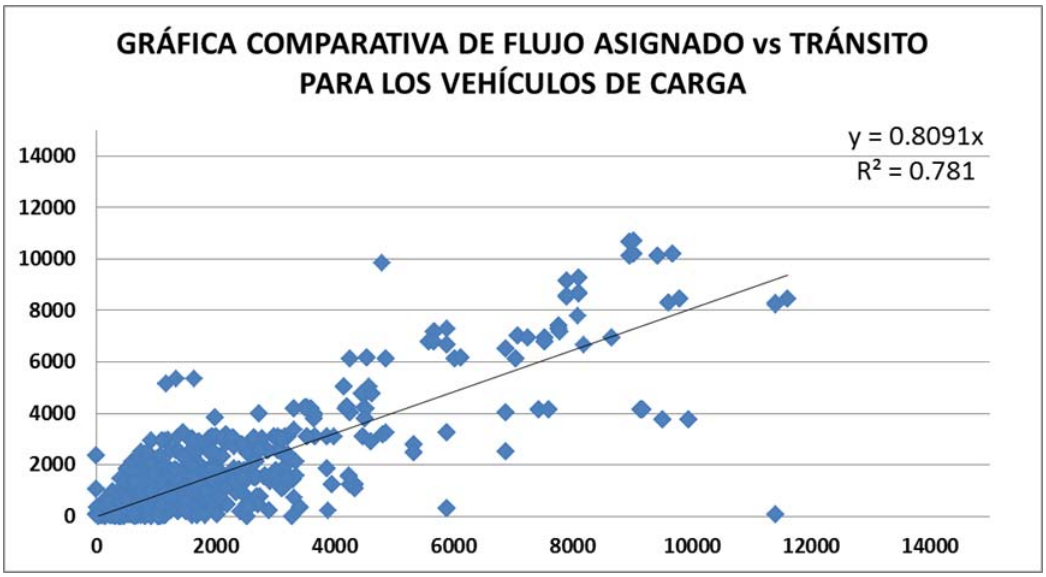
En esta primera comparación, como suele ocurrir en los modelos de asignación, la comparación lineal entre flujos pronosticados y flujos observados resultó muy pobre, tanto en la pendiente de la recta esperada Y = X, como en el valor del coeficiente de determinación R^2.

Debido a lo anterior, se aplicó un proceso de ajuste de la matriz O-D original (matriz semilla) utilizando el método de Nielsen que se encuentra disponible en el

software TransCAD. Luego de este ajuste, se obtuvieron comparaciones lineales mejoradas, como muestra el resumen de la siguiente tabla.

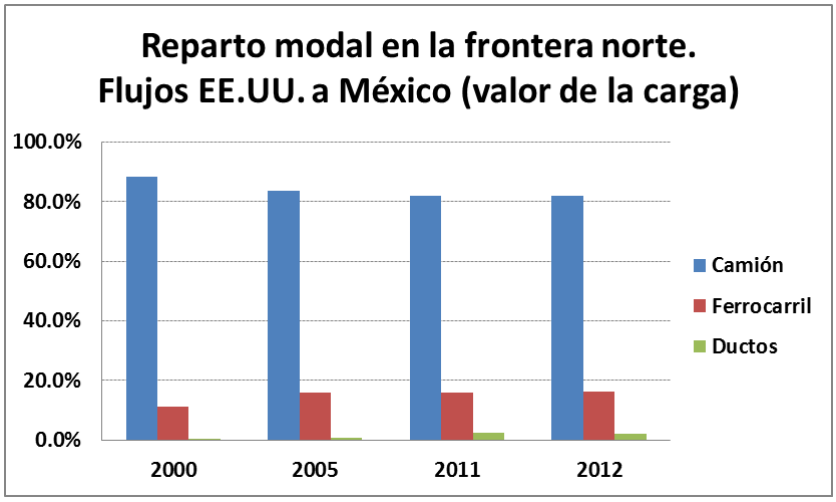
	Con Matriz Semilla		Con Matriz Ajustada	
Tipo vehicular	**Ecuación Y = X**	**Coef. R^2**	**Ecuación Y = X**	**Coef. R^2**
C2	Y = 0.0824X	0.3470	Y = 0.7966X	0.7663
C3	Y = 0.2558X	0.3577	Y = 0.8419X	0.8094
T3S2	Y = 0.4071X	0.3458	Y = 0.7743X	0.7249
T3S3	Y= 0.2816X	0.1464	Y = 0.7485X	0.5741
T3S2R4	Y = 0.2721X	0.3098	Y = 0.7575X	0.6567

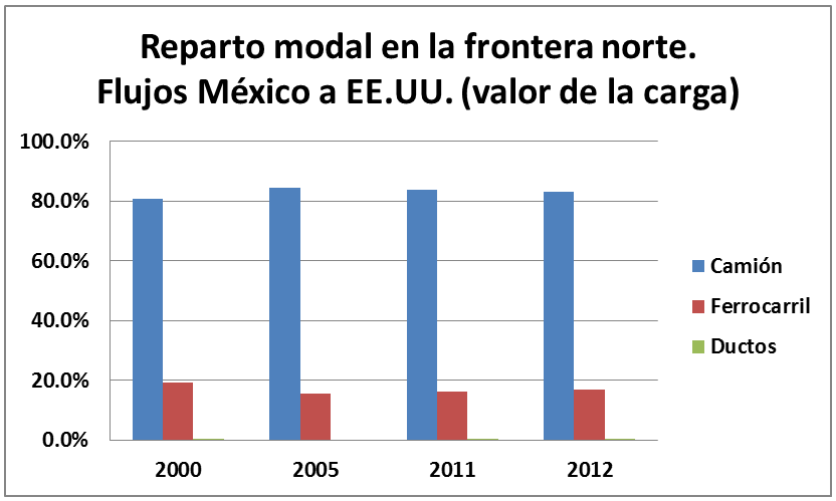
Luego de integrar la totalidad de los tipos vehiculares, el ajuste global también resultó mejorado. La siguiente gráfica muestra el resultado del ajuste de la matriz O-D para el modo carretero.



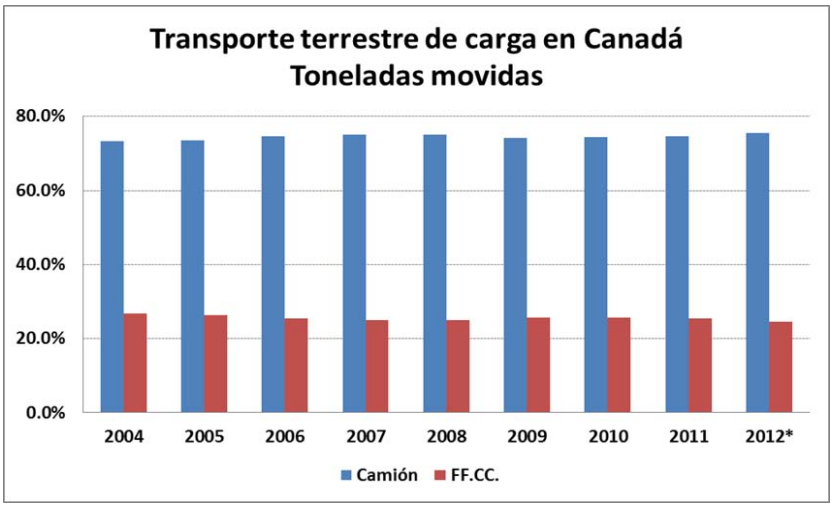
Prosiguiendo con el capítulo 3, se hace una revisión del tema de reparto modal carretera-ferrocarril en varios países desarrollados: Estados Unidos, Canadá y la Unión Europea.

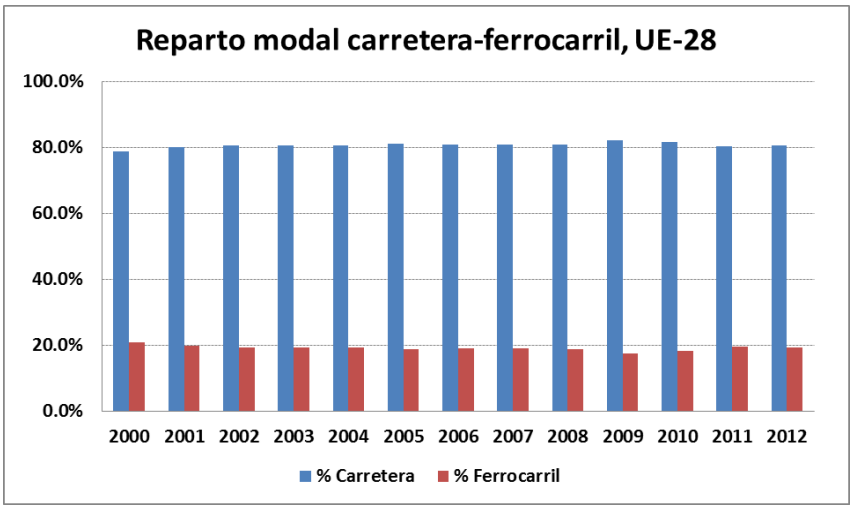
De particular interés resultó la información del reparto modal de carga en la frontera de México con Estados Unidos, que se ilustra en las dos figuras siguientes, donde se observa la dominancia del autotransporte sobre el ferrocarril en el valor de la carga, tanto de exportación como de importación.





Este dominio del autotransporte de carga en los flujos terrestres ocurre también en Canadá y la Unión Europea, como se ve en las siguientes figuras sobre toneladas movidas en Canadá y toneladas-kilómetro en la Unión Europea.





En el capítulo 3 se examinan también algunas consideraciones sobre el reparto modal carretera-ferrocarril, partiendo de la definición del indicador Reparto Modal del Transporte de Carga (*Modal Split of Freight Transport*) propuesto por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) como:

El porcentaje de participación de cada modo (carretera, ferrocarril y navegación interior) en el movimiento total de carga doméstico, medido en toneladas-kilómetro).

Se revisan las características operativas y de eficiencia de cada modo y las posibilidades de transferencia de carga hacia el ferrocarril. Se observa también que no todos los movimientos del autotransporte pueden transferirse al ferrocarril. Un factor clave que limita esta operación es la distancia de recorrido de los embarques. Solo algunos servicios ferroviarios son competitivos con el autotransporte en distancias cortas; por ejemplo, movimientos de carga a granel en trenes unitarios. En general, la mayor competitividad del ferrocarril se presenta en las grandes distancias.

Las cargas que se mueven en tiempos menores a un día históricamente se han llevado por autotransporte y corresponden a distancias de cerca de 800 km. Una excepción a esto es el movimiento de cargas muy pesadas que sólo se mueven por ferrocarril, como el carbón o los minerales que van desde las minas hasta puertos o plantas industriales. El movimiento intermodal con distancias mayores a 800 km es un mercado atractivo para la transferencia carretera-ferrocarril: permite a los clientes mover cargas en distancias largas por ferrocarril (ahorrando así pagos a conductores) y utilizar el camión en los tramos cortos en el origen y en el destino del movimiento, sin necesidad de desconsolidar los contenedores utilizados.

Independientemente de la distancia, el servicio o la tecnología ferroviaria, hay ciertas cargas con las que el ferrocarril no puede competir. Algunas armadoras de automotores, por ejemplo, prefieren el autotransporte por los requerimientos

particulares del manejo de esas cargas (estos embarcadores son muy sensibles a las demoras y prefieren la flexibilidad del autotransporte), y en otro ejemplo, hay cargas a granel que podrían necesitar moverse en pequeñas cantidades o llegar a destinos que no alcanza el ferrocarril.

Muchas empresas ferroviarias y gobiernos están desarrollando agendas y estrategias para mejorar al ferrocarril e inducir la transferencia de carga desde el modo carretero. La Comisión Europea (CE) ha publicado en sus documentos de política la meta de lograr transferir el 30% de la carga carretera en distancias promedio de 300 km hacia el ferrocarril en el año 2030. Para lograr esto, la CE concluye que debe desarrollarse la infraestructura adecuada con base en la inversión y la innovación, aunque no ha especificado el detalle de las inversiones necesarias.

Continuando con el capítulo 4, se muestran los resultados del modelo bajo dos escenarios básicos: primero considerando las redes carretera y ferroviaria separadamente, y luego considerando la operación de ambos modos en la red bimodal. En ambos casos se muestran los flujos resultantes cuando no se permite transferencia de cargas entre los modos y cuando sí se permite esa transferencia. El criterio de asignación utilizado sólo toma en cuenta los tiempos de recorrido en las distintas rutas de ambas redes, y considera el efecto de congestión en la red carretera con una función de volumen-demora del tipo BPR, para la cual se usan los siguientes parámetros propuestos para las carreteras mexicanas.

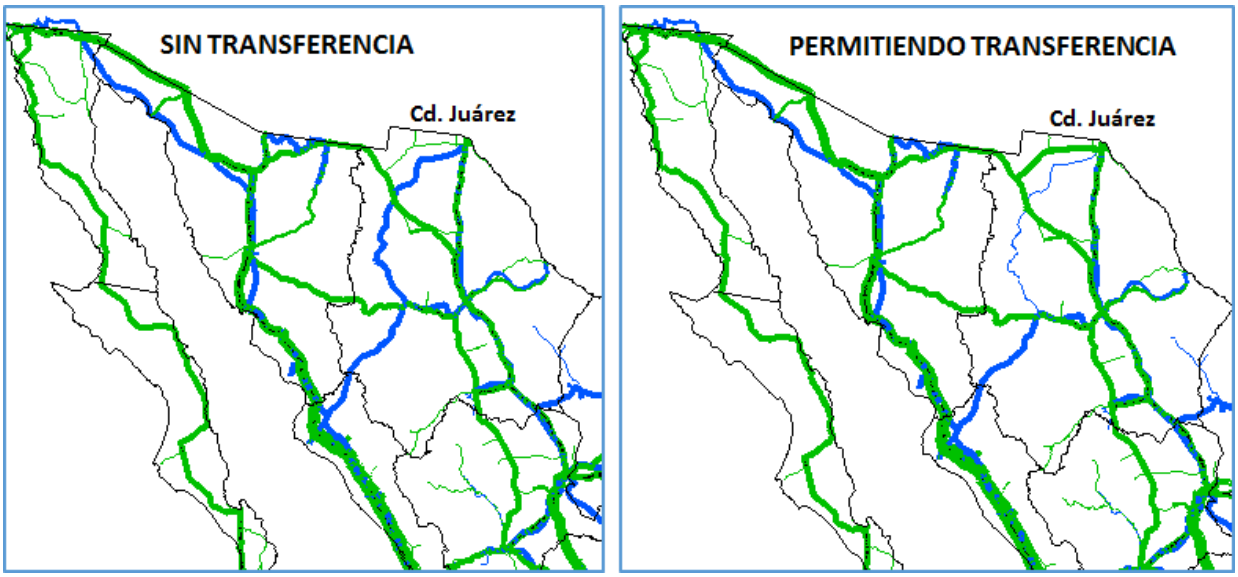
	Autopistas		Libres de peaje	
Coeficiente	100 km/h	80 km/h	100 km/h	80 km/h
α	0.83	0.56	0.83	0.71
β	5.5	3.6	2.7	2.1

En el modo ferroviario, dado que los flujos son más controlados, y los trenes no tienen tanta libertad de elegir rutas como lo hacen los usuarios de la carretera, se usa el criterio de todo-o-nada.

En las asignaciones de flujos donde no se permitió la transferencia de carga se observaron mayores intensidades de volúmenes vehiculares en la carretera, en comparación con los flujos ferroviarios. En la asignación en que se modeló la posibilidad de transferir carga entre los modos se observaron cambios que favorecieron ligeramente al modo carretero. Así, por ejemplo se observó una reducción en los flujos ferroviarios en los siguientes tramos de la red:

- Cd. Juárez – Nuevo Casas Grandes – Madera
- Gómez Palacio – Hipólito
- Tamuín – Cd. Mante
- San Luis Potosí – Vanegas

En la siguiente figura se observan las diferencias de flujo en un acercamiento del mapa para los movimientos hacia Ciudad Juárez, donde se reduce el flujo ferroviario en la línea azul para la asignación donde se da transferencia de carga entre los modos.



Esta reducción que se observa en los flujos vehiculares ferroviarios del modelo resulta del criterio de asignación que utiliza los tiempos de recorrido en las distintas rutas, aun cuando se modela la congestión carretera con la función BPR mencionada antes.

En desarrollos futuros del modelo, teniendo disponibles costos de operación en ambos modos, las asignaciones resultantes seguramente serán distintas y permitirán evaluar de mejor manera las posibilidades reales de transferir carga del autotransporte hacia el ferrocarril

Finalmente, en el capítulo 5 se resumen las principales conclusiones del trabajo. Primeramente, en el proceso de diagnóstico de los resultados del modelo se ajustó la primera matriz OD del modo carretero (matriz semilla) con el método de Nielsen (1998), disponible en el software TransCAD, logrando una mejor estimación de esta matriz O-D, con lo cual se genera la base de modelación de los próximos ejercicios de asignación.

Cabe notar que la literatura indica que para lograr un uso exitoso del método de Nielsen se deben tener supuestos razonables en el modelo de asignación (Caliper, 2013), lo que implícitamente califica la caracterización de la función de impedancia BPR utilizada como razonable, aunque eso no excluye mejoras futuras de dicha caracterización.

Finalmente, se identifican las siguientes líneas para trabajo futuro en el tema de reparto modal óptimo:

1) Uso de la medida GEH para comparaciones de flujos estimados por el modelo de asignación y los flujos observados. Este indicador, aunque a veces es llamado *el estadístico GEH*, realmente no es una prueba estadística de hipótesis, sino una fórmula empírica que propuso Geoffrey E. Havers, cuando trabajaba como planificador del transporte en Londres en la década de los años 1970 (Ortúzar and Willumsen, 2011). El indicador GEH se define como sigue.

$$GEH = \sqrt{\frac{2\left(O_j - E_j\right)^2}{\left(O_j + E_j\right)}}$$

donde Oj y Ej son los flujos observado y estimado respectivamente, en el tramo j de la red. El indicador GEH se utiliza ampliamente en la modelación de asignación de flujos y es menos sensible a las dificultades de comparar flujos en redes que tienen tramos con valores muy altos y otros con valores bajos.

2) Comparaciones con flujos en la frontera México-E.U.A.
Entre los resultados del modelo de asignación hay estimaciones de flujos de carga con destino en puntos de la frontera norte, tanto para autotransporte como para ferrocarril. Los flujos de carga en la frontera norte de México son de particular interés para la planeación del transporte de carga por parte de la SCT y el propio IMT.
Si bien datos de TDPA sirven para comparar los flujos carreteros, no se tiene una fuente semejante de datos para el caso ferroviario. Una alternativa a considerar es comparar los flujos pronosticados por el modelo con la información de flujos fronterizos que publica el servicio de Datos sobre Carga Transfronteriza de América del Norte (*North American Transborder Freight Data*, NATFD), de la Oficina de Estadística de Transportación (*Bureau of Transport Statistics*)de Estados Unidos.

3) Consideraciones sobre el modelado.
Estas son tres observaciones sobre modelado que surgieron en el desarrollo del presente trabajo:

   a) Realizar varios análisis de sensibilidad sobre los parámetros α y β de las funciones BPR propuestas para modelar el sistema carretero federal, a fin de detectar rangos de variación de estos parámetros que conserven la consistencia de las estimaciones de flujos.

   b) Abordar el problema de la actualización de las matrices OD utilizadas, para generar estimaciones de matrices para años

posteriores a 2010, que es el año base del modelo construido en la primera etapa.

c) Ensayar la combinación de las funciones de impedancia BPR con funciones de tipo Cónica, para seguir las recomendaciones de la literatura en la materia (Spiess, 1990), al tratar resultados de estimaciones de flujos en ejercicios de asignación que producen flujos estimados que exceden las capacidades de algunos tramos.

Estas líneas de trabajo futuro pueden partir del modelo revisado que se reporta en este trabajo y continuar el refinamiento y mejoramiento de los flujos estimados siguiendo la metodología expuesta.

1 Introducción

En el año 2013, la Coordinación de Integración del Transporte del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) inició un estudio sobre el reparto modal óptimo del transporte terrestre de carga en México, primeramente por tratarse de un tema pertinente dentro de su línea de investigación en la Planeación Nacional y Regional del Transporte y, por otra parte, por el interés manifestado por la Dirección General de Autotransporte Federal en diversas reuniones de trabajo.

En la primera etapa de investigación se desarrolló el proyecto TI-04/13, "*Reparto modal óptimo del transporte terrestre de carga en México. 1ª etapa*", terminado a finales de 2013 como la Publicación Técnica No. 413, y en el cual se revisaron los antecedentes de tratamiento del tema; el acopio de datos de las redes carretera y ferroviaria, así como de los flujos de transporte terrestre de carga; la construcción y ajuste de las primeras matrices O-D, y también la modelación computacional usando el software para la planeación de transporte TransCAD.

En la esa primera etapa se hicieron las corridas de prueba de la red bimodal carretera-ferrocarril y se analizaron los primeros resultados de los ejercicios de asignación de flujos.

El trabajo desarrollado en la primera etapa de estudio ha permitido identificar oportunidades de mejora en la modelación, así como necesidades adicionales de datos e información relacionada con el movimiento de carga terrestre y la infraestructura.

Esta circunstancia es la que dio lugar a la propuesta de una segunda etapa de investigación en el tema del reparto modal óptimo.

De esta manera, partiendo de la experiencia de modelación adquirida en la primera etapa del estudio, el objetivo general de la segunda etapa es completar cifras faltantes, obtener información y datos con mayor detalle sobre movimientos terrestres de carga, así como ensayar escenarios diversos para afinar el modelo construido y lograr resultados mejorados en los ejercicios de asignación de flujos de carga en México.

Dentro de esta segunda etapa, se incursiona también en el uso del software de planeación del transporte VISUM, que produce la empresa alemana PTV Group, la cual ha celebrado con el IMT un convenio de colaboración tecnológica.

El software VISUM es un producto de gran aceptación en el ambiente de la planificación del transporte a nivel mundial y es un fuerte competidor de otros paquetes similares como TransCAD de la empresa Caliper, EMME/2 de la empresa INRO o Cube de la empresa Citilabs.

La experiencia previa de modelación de reparto modal en la primera etapa, realizada usando TransCAD, ha servido de antecedente para migrar los detalles de modelación hacia el software VISUM con el fin de familiarizarse con este producto.

El presente trabajo se inicia haciendo un diagnóstico del desempeño del modelo de reparto modal óptimo desarrollado en la primera etapa.

El diagnóstico incluye una revisión de los siguientes aspectos del modelo:

- Conectividad de la red bimodal carretera-ferrocarril.
- Pruebas de generación de rutas más cortas en la red bimodal construida, para verificar la conexidad entre las redes carretera y ferroviaria.
- Comparaciones entre los flujos pronosticados por el modelo de asignación y los flujos deducidos de información de tránsito diario promedio anual (TDPA) que publica la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT.

Como complemento al diagnóstico del modelado en la primera etapa, en este trabajo se prosigue con una revisión de literatura sobre la experiencia de reparto modal en otros países, a fin de identificar metodologías y buenas prácticas que tengan potencial de uso para el caso mexicano.

Enseguida, se hace una revisión de los procedimientos de actualización de las matrices OD utilizadas en la primera etapa, a fin de tener estimaciones de mejor desempeño, aplicando las metodologías que resulten adecuadas para replicar el ejercicio de modelación con la información actualizada.

Luego de la actualización del modelo de reparto modal, se continúa ensayando con varios escenarios de interés para la planeación, con corridas de asignación en algunos corredores que son relevantes en el movimiento de carga en México.

Finalmente, se da un resumen de conclusiones y recomendaciones para posibles trabajos futuros sobre el tema.

2 Diagnóstico de desempeño del modelo en la primera etapa

En este capítulo se revisan los procedimientos de construcción del modelo de reparto modal realizado en la primera etapa, así como una evaluación de los resultados obtenidos en las corridas del modelo para los escenarios que se probaron.

La verificación de la conexidad de la red bimodal carretera-ferrocarril y las comparaciones entre los flujos estimados y los deducidos de la información de los "datos viales" que publica la SCT se consideraron como elementos centrales para estimar la calidad de los resultados obtenidos.

2.1 Primeros resultados del modelo

El modelo de la primera etapa se desarrolló sobre una red bimodal representando los modos carretero y ferroviario de la red de transporte terrestre en México.

La representación de las redes carretera y ferroviaria se realizó con el software TransCAD, a partir de datos de las carreteras federales y la infraestructura concesionada a las principales empresas ferroviarias que operan en México.

Las dos redes se obtuvieron previamente en formato ESRI Shapefile usando una proyección cónica conforme de Lambert (CCL) con las siguientes características:

- Esferoide: Clarke 1866
- Meridiano Central: -102°
- Latitud de referencia: 12°
- Paralelo estándar 1: 17.5°
- Paralelo estándar 2: 29.5°
- Falso Este: 2500000
- Falso Norte: 0

El formato ESRI Shapefile es un estándar muy utilizado en el intercambio de información entre sistemas de información geográfica. En cuanto a la proyección, se eligió la CCL ya que es de uso común para representaciones del territorio a nivel nacional.

Características de la red bimodal

La red carretera está formada por 9,218 arcos, 8,612 nodos y 564 centroides (ciudades principales y localidades del país) que se extienden a lo largo de 56,363 kilómetros (de los cuales 44,400 son administrados por el gobierno federal, 8,616 administrados por el gobierno estatal, 2,496 administrados por el municipio y el restante es administrado por particulares o no se encuentra descrito).

La figura 2.1 muestra la red carretera utilizada. Dicha red está georreferenciada, y para la modelación dispone de una capa de información con los siguientes atributos: distancia, tiempo de viaje (en minutos) y capacidad (vehículos por hora).

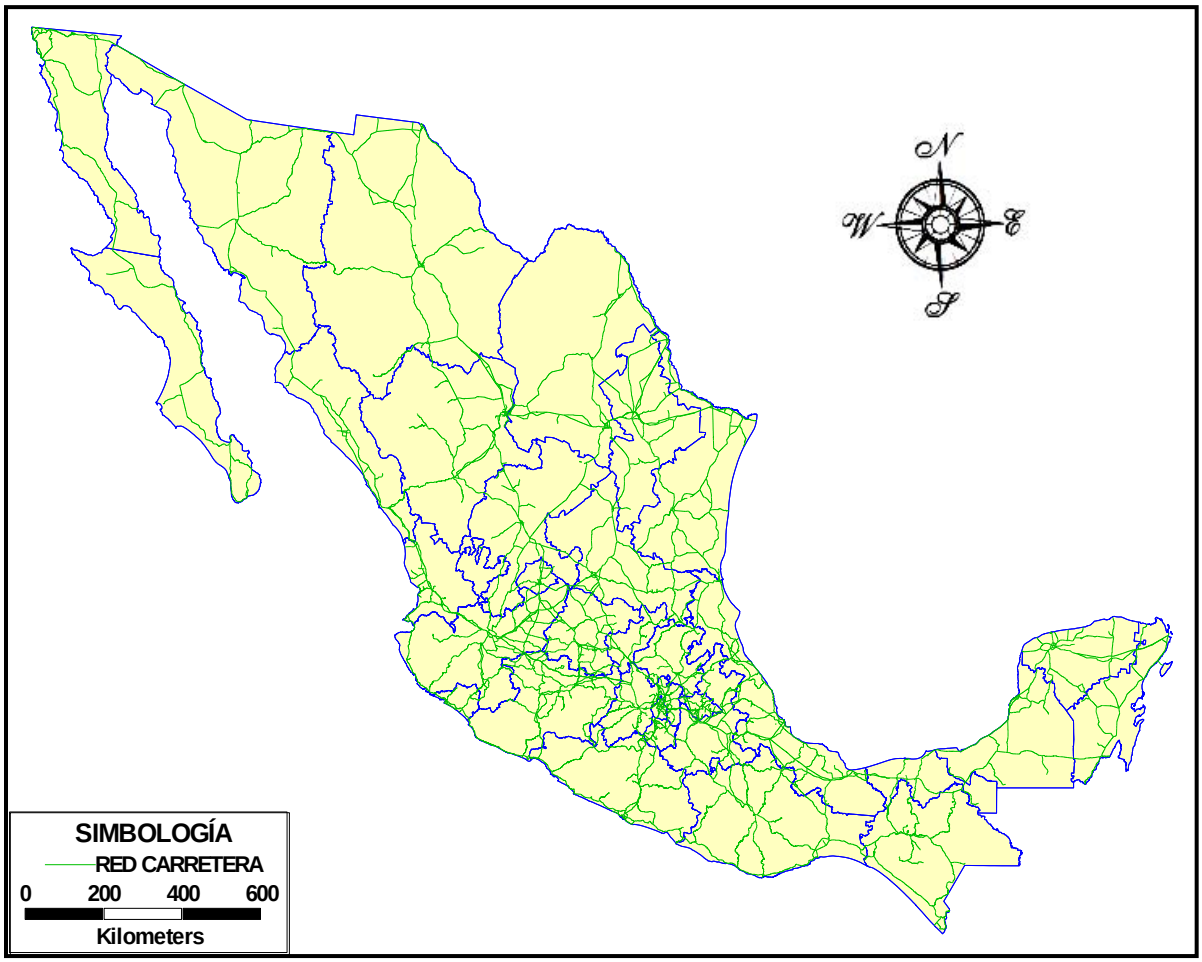


Figura 2.1. Representación de la red carretera nacional.

La red ferroviaria georreferenciada se obtuvo en formato Shape y se cambió a una proyección CCL, con las mismas especificaciones que la red carretera, para asegurar el ajuste entre las dos capas.

La red de ferrocarril está conformada por 3,430 arcos, 3,357 nodos y 840 centroides (estaciones de ferrocarril), como se puede apreciar en la figura 2.2.

La longitud de la red de ferrocarril es de 21,066.27 kilómetros asociados a una tabla con información con los atributos: distancia, velocidad máxima de operación y tiempo de viaje (en minutos).

Figura 2.2. Representación de la red ferroviaria nacional.

Para conformar la red bimodal, se unieron ambas redes a través de conectores a centros de transferencia intermodal, los que representan terminales intermodales o instalaciones especializadas de empresas importantes que pueden manejar carga ferroviaria. Una vez conformadas las redes se corrió el modelo considerando dos casos: a) sin intercambio de flujos entre la red carretera y la ferroviaria, y b) permitiendo el intercambio de flujos en las terminales intermodales y puntos de transferencia.

Las figuras 2.3 y 2.4 muestran los resultados.

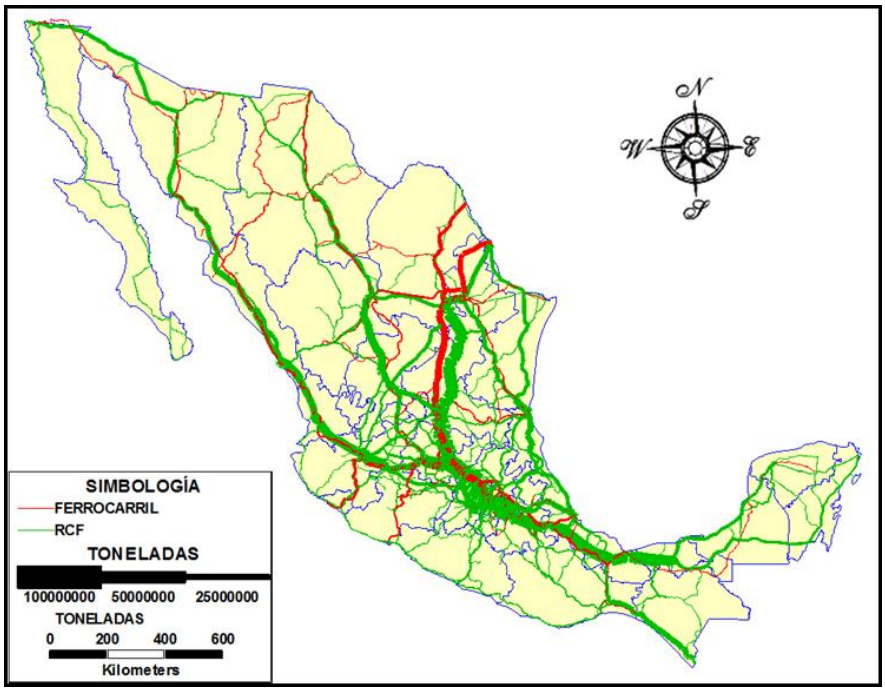


Figura 2.3 Asignación de carga por ambos modos, sin intercambio de flujos (fuente: elaboración propia).

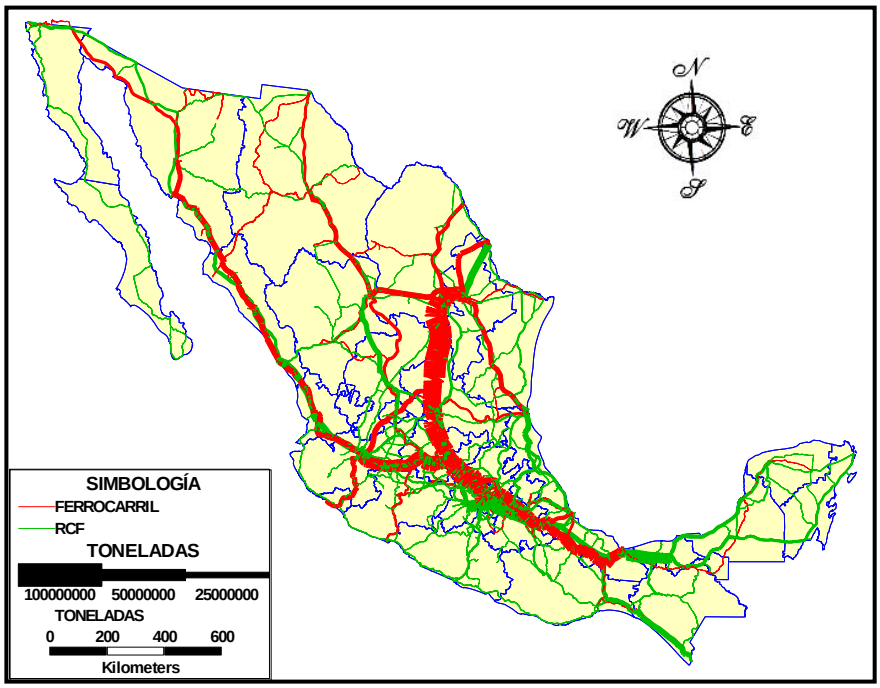


Figura 2.4 Asignación de carga por ambos modos, permitiendo intercambio (fuente: elaboración propia).

Considerando los costos operativos de los distintos modos, y ya que la congestión vehicular se presenta solamente en el modo carretero, la modelación mostrada revela que, ante el aumento de la congestión en el sistema carretero, lo cual alarga los tiempos de recorrido del autotransporte, se tiene una buena oportunidad de transferir carga al sistema ferroviario, como se ve en el mapa de la figura 2.3.

Verificación de conectividad en la red bimodal

Una importante tarea previa a la modelación consiste en verificar que la red esté totalmente conectada (que sea conexa), pues ello es condición necesaria para asegurar la posibilidad de utilizar todos los arcos disponibles. Por tanto, de la conectividad de la red dependen los resultados y la calidad del modelo de asignación.

El método utilizado en el presente trabajo para verificar la conectividad de la red bimodal está basado en cinco técnicas diferentes que resultan complementarias:

a) Verificación de nodos con el software TransCAD.
b) Generación de una matriz de distancias mínimas.
c) Cálculo de ruta más corta.
d) Asignación de una matriz de ceros y unos para asignación todo o nada.
e) Verificación con Visum.

A continuación se describe cada una de las técnicas señaladas.

a) Verificación de la red con herramientas del softwareTransCAD

Una vez cargada la red bimodal en el espacio de trabajo, se utiliza la función ***Check line layer connectivity*** del menú ***Tools – Map editing – Check line layer connectivity.*** Las figuras 2.5 y 2.6 muestran los cuadros de diálogo correspondientes.

Esta herramienta permite realizar una búsqueda por cada nodo, dentro de un radio establecido de distancia. Para un primer nodo, busca los nodos más cercanos a éste; si no encuentra nodos continúa con el siguiente. Si encuentra nodos más cercanos, verifica aquellos que tengan códigos de identificación ID distintos al ID del primer nodo. Esto le indica al programa que éstos no están conectados a dicho nodo y, por tanto, se busca si tienen relación a través de un arco.

Al terminar la búsqueda, TransCAD crea tres conjuntos o ***"selection sets"*** marcados en colores rojo, amarillo y verde. El rojo indica que los nodos son cercanos (conforme al rango de búsqueda) pero que no están conectados con otros nodos. El amarillo indica que los nodos son cercanos (conforme al rango de

búsqueda) y que sí están conectados a nodos cercanos. El verde indica que todos los nodos dentro del rango de búsqueda están conectados.

Los nodos marcados en rojo tienen mayor probabilidad de impedir la continuidad de la red. Los nodos marcados en amarillo usualmente son nodos que no debieran estar conectados entre sí con otros nodos, como ocurre con los puentes vehiculares, pero se deben verificar. Los nodos marcados en color verde indican que se encuentran conectados; un ejemplo de esto se aprecia en la figura 2.7.

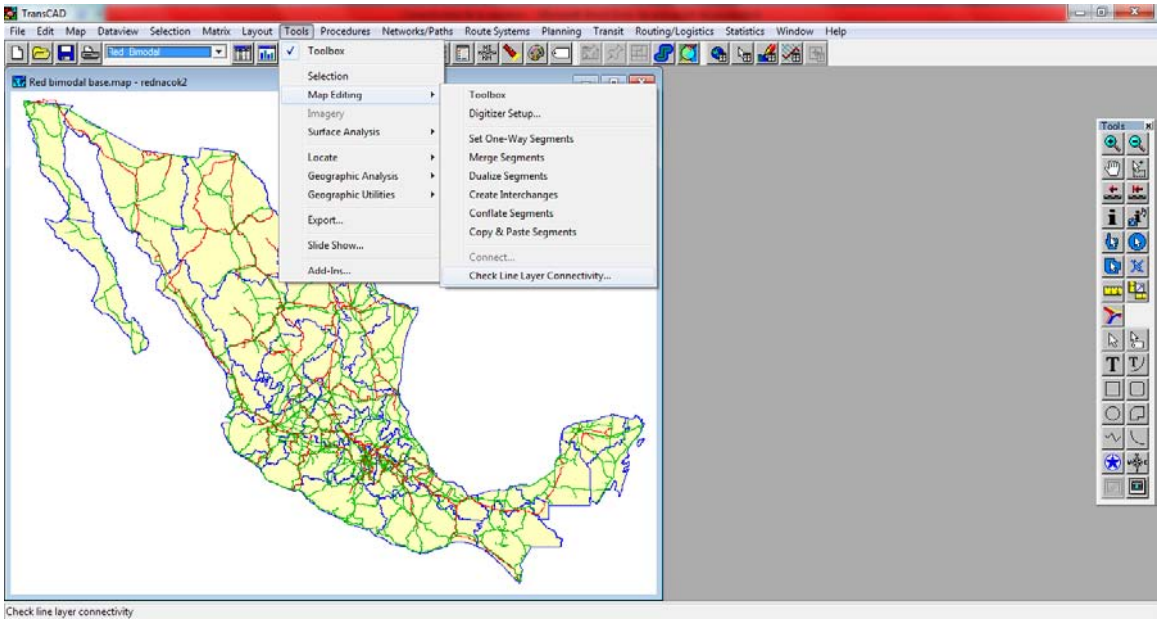


Figura 2.5. Herramienta utilizada en el software TransCAD para verificar la conectividad de los arcos en la red bimodal (elaboración propia).

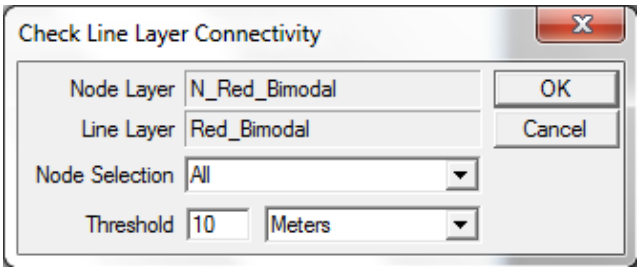


Figura 2.6. Configuración de opciones de la herramienta del software TransCAD para verificar la conectividad de los arcos en la red bimodal (elaboración propia).

La figura 2.7 muestra el caso típico cuando los nodos de la red se encuentran desconectados, mientras que la figura 2.8 muestra el caso típico cuando detecta un problema de conectividad parcial como sucede en los puentes vehiculares. El

uso de esta herramienta presenta grandes ventajas, ya que muestra gráficamente la ubicación de los nodos desconectados. La desventaja que presenta son el tiempo de cómputo y los recursos de memoria RAM para realizar el proceso.

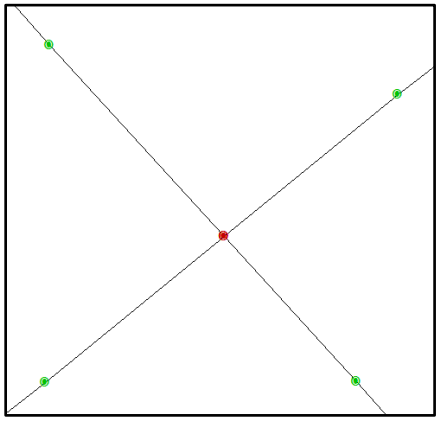


Figura 2.7. Diagrama de conectividad por colores, resultado del análisis hecho con el software TransCAD para un cruce a nivel de los arcos en la red bimodal.

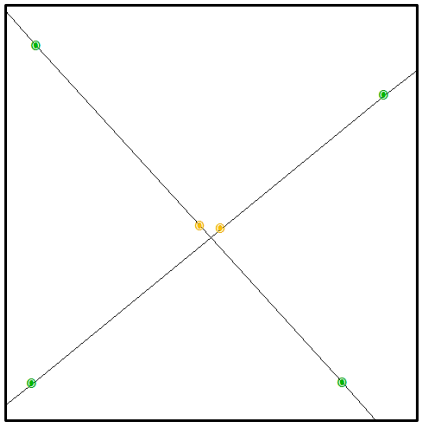


Figura 2.8. Diagrama de conectividad por colores, resultado del análisis hecho con el software TransCAD para un cruce a desnivel de los arcos en la red bimodal.

b) Matriz de distancias mínimas

La revisión de la conectividad mediante la segunda técnica también utiliza TransCAD. Una vez cargada la red bimodal dentro del espacio de trabajo, se usa en el menú la opción **Network/Paths – Multiple Paths**; esto se muestra en la figura 2.9. El cuadro de diálogo que se despliega se ve en la figura 2.10, que muestra las opciones para configurar.

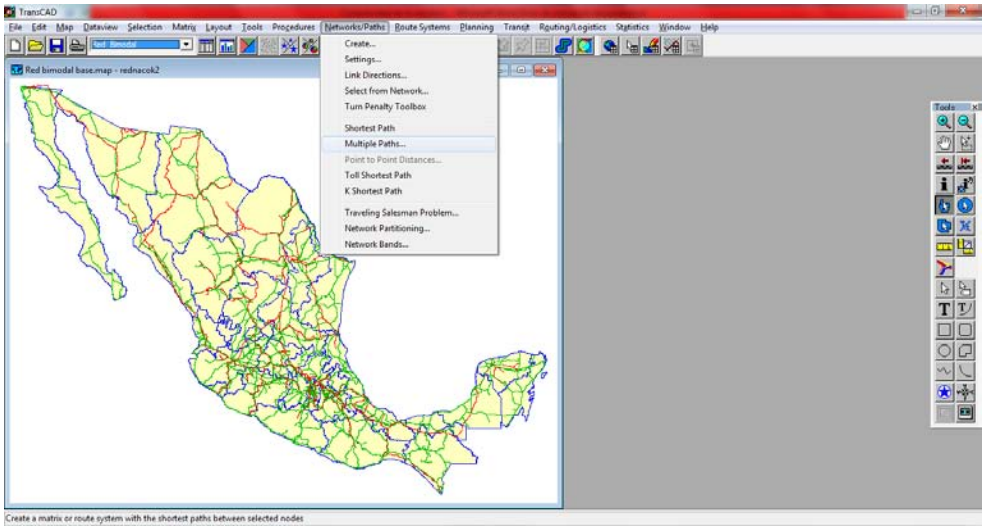


Figura 2.9. Herramienta utilizada para generar una matriz de distancias entre los nodos en el software TransCAD para verificar la conectividad de los arcos en la red bimodal.

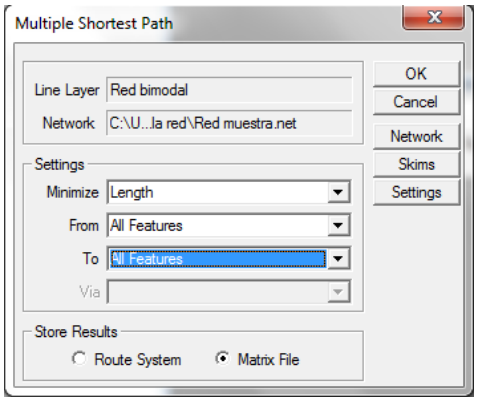


Figura 2.10. Configuración de opciones de la herramienta utilizada en el software TransCAD para calcular las distancias más cortas y verificar la conectividad de los arcos en la red bimodal.

Al terminar el proceso el software no marca ningún error, pero devuelve como valores nulos dentro de la matriz generada aquellos pares OD que no están conectados.

Este proceso presenta la ventaja de ser muy rápido pero tiene la desventaja de que cuando en la red hay caminos alternos para llegar desde un origen hasta un destino, medirá una distancia por una ruta alterna y no devolverá un valor nulo, lo cual impedirá saber si los arcos de un camino se encuentran conectados entre sí, además de que gráficamente no muestra ningún resultado.

c) Ruta más corta

Dado el tamaño y la complejidad de la red bimodal, se consideró conveniente verificar la conectividad en ambas redes a través de la herramienta de ruta más corta en TransCAD, con la intención de simular el comportamiento de un usuario que se encuentra conectado a la red carretera y desea trasladar carga a la red ferroviaria.

Por ejemplo, para trasladarse desde Santa María del Oro en Durango hasta la estación de ferrocarril Babicora en Chihuahua, el usuario tendría que trasladarse hasta la terminal intermodal de Chihuahua para realizar el trasbordo, como se puede ver en la figura 2.11.

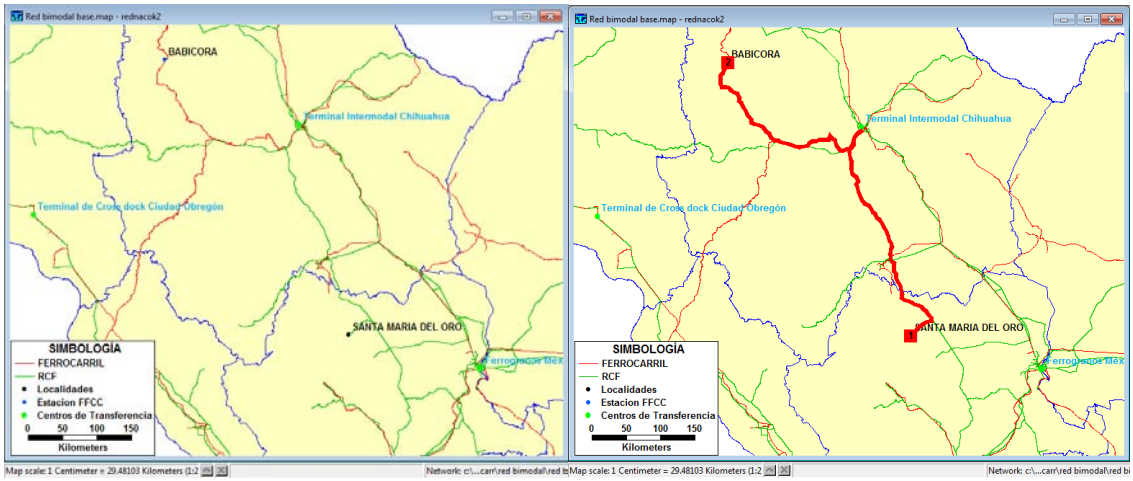


Figura 2.11. Ruta más corta desde Santa María del Oro hasta Babicora, utilizando la herramienta de ruta más corta del software TransCAD para verificar la conectividad de los arcos en la red bimodal.

La ventaja de esta técnica es que se pueden verificar varios arcos a la vez trazando rutas de gran distancia, como se muestra en la figura 2.12. La desventaja principal que presenta es que, cuando no puede encontrar la ruta más corta, no muestra los nodos desconectados, por lo cual se deberán trazar rutas más pequeñas para detectar los puntos con discontinuidad.

El principal uso que se le dio a esta herramienta fue para verificar la conectividad entre la red de carreteras y la red de ferrocarril.

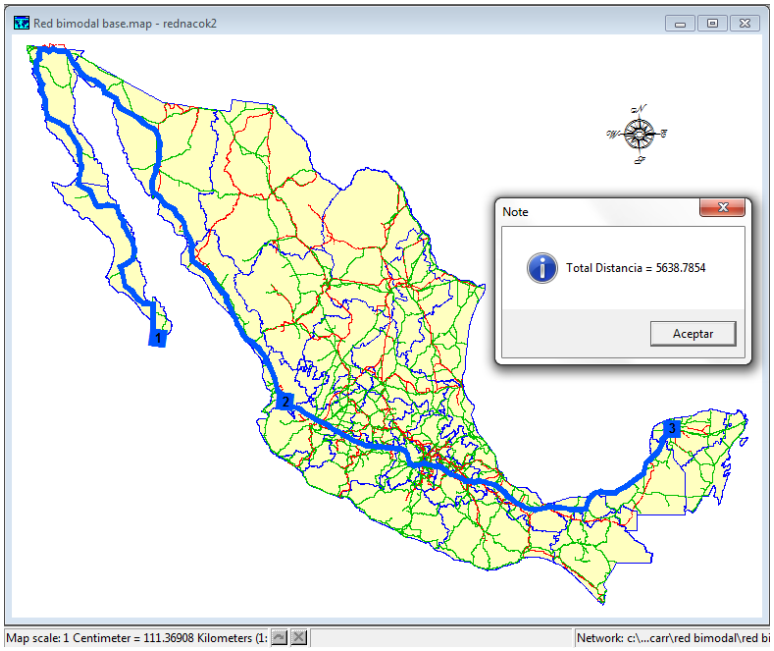


Figura 2.12. Ruta más corta desde Los Cabos hasta Mérida, pasando por Guadalajara, utilizando la herramienta de ruta más corta en el software TransCAD, que permite verificar la conectividad de los arcos en la red bimodal.

d) Asignación de matriz de ceros y unos

Esta técnica para verificar la conectividad de la red consiste en generar una matriz de dimensiones $m \times m$, donde m = el total de nodos en la red. Las entradas de esta matriz son valores de 1 en los pares OD y 0 en el resto de la matriz.

El siguiente paso es ejecutar el modelo de asignación denominado ***"todo nada"*** e, independientemente de si se ejecuta el modelo o no, el software mostrará una lista de errores (si los hay) como en el siguiente ejemplo:

```
There is no path between the following OD pair(s):
                1 - 2
                " - 3
                " - 4
                " - 6
                " - 7
                " - 9
                " - 10
                " - 11
                " - 12
                " - 13
                " - 14
                2 - 1
                " - 3
```

```
                    " - 4
                    " - 5
                    " - 7
                    " - 8
                    " - 9
                    " - 11
                    " - 13
                    " - 14
                    3 - 1
                    " - 2
                    " - 4
                    " - 5
                    " - 6
                    " - 8
                    " - 10
                    " - 11
Additional unlisted errors present (too numerous to list).
```

El mensaje anterior muestra que los nodos 1, 2 y 3 no están conectados al total de nodos, por lo que da una idea de dónde buscar los trazos discontinuos partiendo de los nodos 1, 2 o 3 hacia el resto de los nodos. Esta discontinuidad se puede encontrar rápidamente utilizando la herramienta de ruta más corta.

Si el modelo de asignación se lleva a cabo con éxito entonces se podrán ubicar gráficamente los arcos con el menor número de viajes asignados, lo cual complementa la lista de errores mostrados por el software.

Esta estrategia implica tiempo y paciencia para encontrar las discontinuidades de la red, pero es un método efectivo para lograr la conectividad al 100 por ciento.

d) Revisión de la red con el software Visum

Otro software de planeación de transporte que se empezó a explorar fue Visum, de la empresa alemana PTV. Este paquete también tiene una herramienta para revisar redes.

Dado que los primeros análisis del presente trabajo se hicieron con TransCAD, primeramente fue necesario exportar la red de TransCAD al formato de Visum.

Hecho esto, utilizando el menú **Calculate – Check network – Check** de Visum se pueden verificar, entre otras cosas, los nodos aislados y las zonas no conectadas a la red, además de que el software muestra los problemas encontrados, si es que los hay.

2.2 Análisis de flujos observados y flujos pronosticados

Los resultados de las corridas del modelo de asignación estiman los flujos vehiculares que circulan en las distintas rutas de la red. Dichas estimaciones deben evaluarse para determinar la precisión con que representan a los flujos reales en la red. Una forma de evaluación es modelar la asignación de flujos con información O-D de un año determinado y comparar con los flujos observados en la red en ese mismo año. En esta primera asignación se consideraron solamente los tiempos de recorrido en la red, con información de velocidades medias del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), usando equilibrio del usuario en la red carretera.

El procedimiento de asignación inicial consideró una matriz O-D de flujos del año 2010 (llamada aquí *matriz semilla*) y datos de tránsito diario promedio anual (TDPA) en la red carretera federal que publica la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT. Los pares O-D de la matriz original se conectaron a los centroides de la red utilizando la herramienta "*connect"* de TransCAD, que hace la conexión a los arcos o nodos más cercanos que encuentre en la red.

Con esta configuración se hizo la primera corrida de asignación de flujos, los cuales se compararon con datos de TDPA. La comparación se hizo para los cinco principales tipos vehiculares: C2, C3, T3S2, T3S3 y T3S2R4. Las figuras 2.13a y 2.13b muestran resultados para los tipos C2 y T3S2, con el ajuste a la recta Y = X.

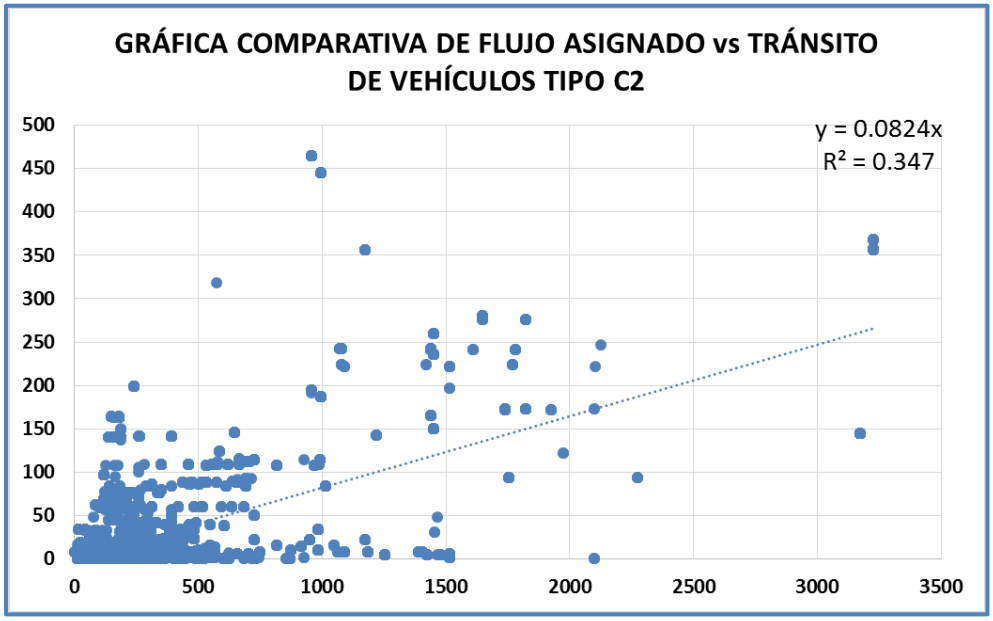


Figura 2.13a. Gráfica de dispersión de vehículos estimados por el modelo de asignación versus tránsito promedio diario anual de vehículos tipo C2.

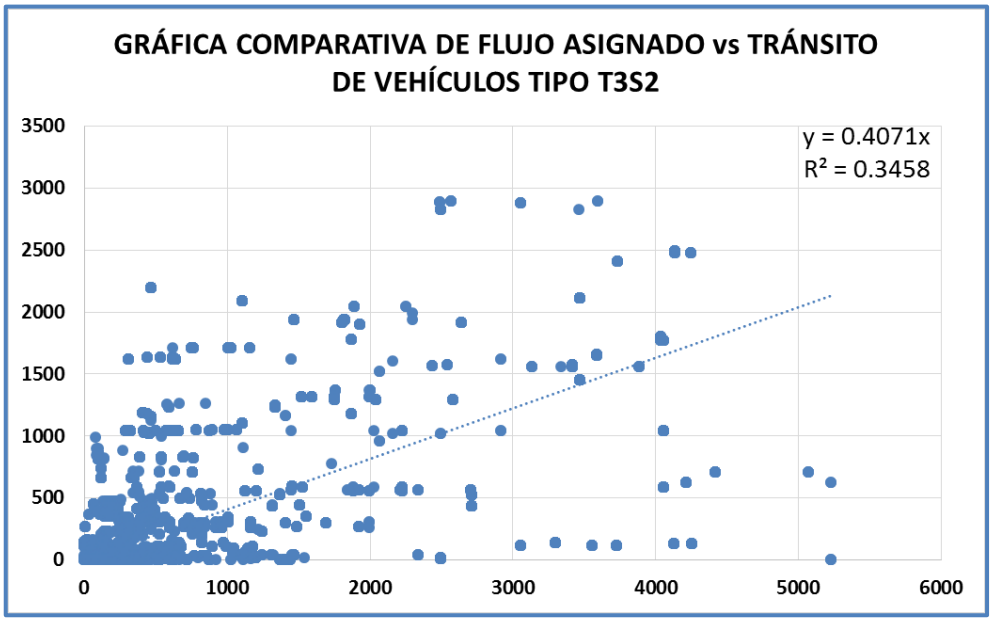


Figura 2.13b Gráfica de dispersión de vehículos estimados por el modelo de asignación versus tránsito promedio diario anual de vehículos tipo T3S2.

Los ajustes de la recta Y = X, en cuanto a la pendiente esperada (*m = 1)* en las figuras 2.13a y 2.13b son bastante malos en ambas rectas. Las gráficas indican una baja correlación entre los flujos estimados por el modelo de asignación y los observados del TDPA para los tipos vehiculares mostrados. Esta baja correlación se observó igualmente en el resto de tipos vehiculares modelados, lo que indica una pobre capacidad predictiva con los datos originales usados.

Este primer resultado ilustra el problema de ajustar una matriz O-D en un modelo de asignación para dar resultados consistentes con observaciones disponibles de tráfico. Para mejorar los resultados de la asignación se ajustó la matriz semilla con el método de Nielsen (1998), disponible en TransCAD. El método considera los conteos vehiculares (datos de TDPA) como variables aleatorias y se puede usar con Equilibrio del Usuario, tanto en versión determinista como estocástica.

El algoritmo de Nielsen es iterativo, al alternarse entre cada paso del proceso de asignación y el de estimación de la matriz O-D. Requiere de una matriz O-D inicial (en este caso, la matriz semilla), recolectada en un estudio piloto, o bien podría tratarse de una matriz sintética de algún modelo de distribución de viajes doblemente restringido. El método de Nielsen se usa ampliamente en la práctica, y hay reportes que indican buenos resultados (Caliper, 2013).

Con la herramienta “OD Matrix Estimation” de TransCAD, usando 20 iteraciones globales con una convergencia de 0.01 para el modelo de asignación y variando el número de iteraciones de la estimación (de 1 a 30) con una convergencia de 0.1,

se obtuvieron ajustes mejorados para las comparaciones. Las figuras 2.14a y 2.14b muestran los resultados ajustados para los tipos vehiculares C2 y T3S2.

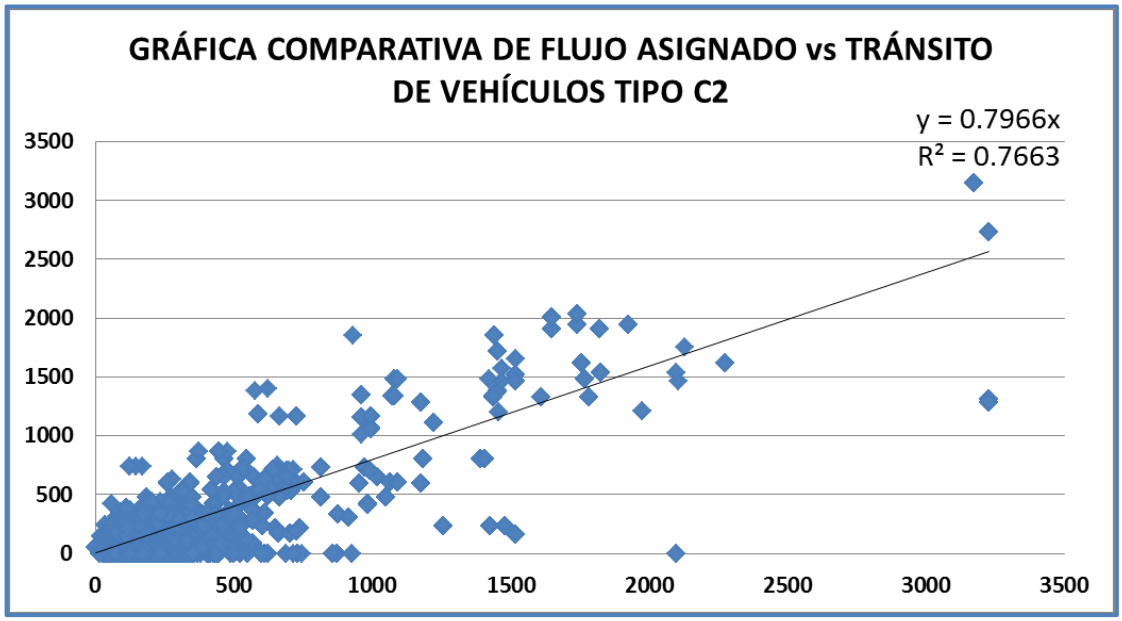


Figura 2.14a. Gráfica de dispersión de vehículos estimados por el modelo de asignación vs TDPA de vehículos tipo C2 tomando como datos de entrada la matriz OD estimada.

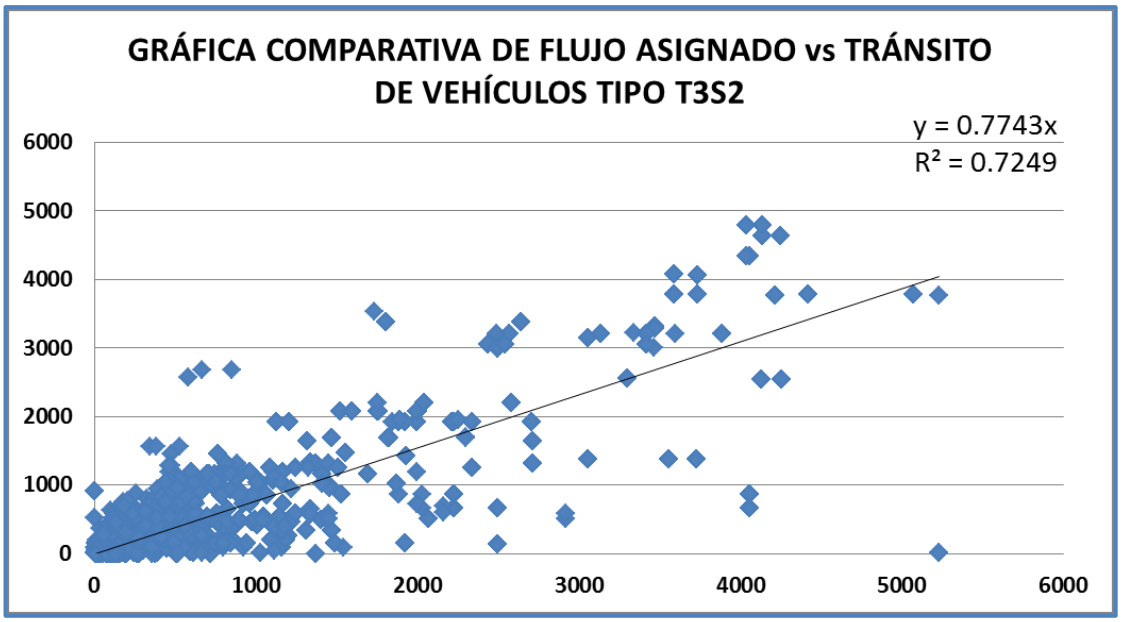


Figura 2.14b. Gráfica de dispersión de vehículos estimados por el modelo de asignación vs TDPA de vehículos tipo T3S2 tomando como datos de entrada la matriz OD estimada.

En las figuras 2.14a y 2.14b se observa una mejoría en la pendiente esperada de la recta Y = X, así como en el coeficiente R^2 para los tipos vehiculares mostrados.

Para los demás tipos vehiculares se obtuvieron también mejoras semejantes. La tabla 2.1 muestra el resumen de los cálculos comparativos con la matriz semilla y con la matriz ajustada, luego de aplicar el método de Nielsen.

Como se ve en esa tabla, el método de Nielsen mejora notablemente la pendiente de la recta de comparación y el coeficiente R^2 del modelo.

Tabla 2.1. Comparación lineal de flujos modelados y flujos de TDPA con la matriz semilla y con la matriz ajustada (elaboración propia)

	Con Matriz Semilla		Con Matriz Ajustada	
Tipo vehicular	**Ecuación Y = X**	**Coef. R^2**	**Ecuación Y = X**	**Coef. R^2**
C2	Y = 0.0824X	0.3470	Y = 0.7966X	0.7663
C3	Y = 0.2558X	0.3577	Y = 0.8419X	0.8094
T3S2	Y = 0.4071X	0.3458	Y = 0.7743X	0.7249
T3S3	Y= 0.2816X	0.1464	Y = 0.7485X	0.5741
T3S2R4	Y = 0.2721X	0.3098	Y = 0.7575X	0.6567

Finalmente, al integrar todos los tipos vehiculares en el modelo de asignación, se obtuvo un ajuste mejorado global, como se muestra en la figura 2.15 enseguida.

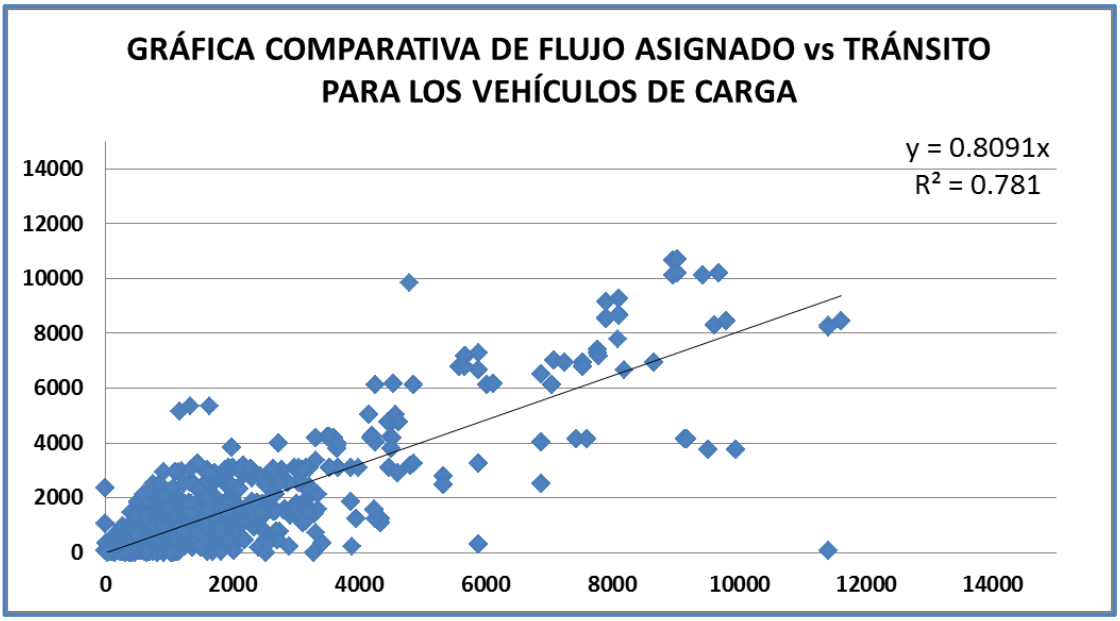


Figura 2.15 Gráfica de dispersión de vehículos estimados por el modelo de asignación vs TDPA de los vehículos de carga, tomando como datos de entrada la matriz OD estimada.

De este modo, el procedimiento ya descrito permitió obtener la matriz OD ajustada para el tránsito vehicular por carretera, para utilizarse en los ejercicios de asignación en la red bimodal, que se describen en el capítulo 4.

3 Reparto modal carretera-ferrocarril en otros países

El reparto del transporte terrestre de carga entre los modos carretero y ferroviario es una vieja cuestión de interés para la planeación del transporte en casi todo el mundo. Las ventajas técnicas, económicas y ambientales que el transporte ferroviario de carga tiene sobre el autotransporte han sido ampliamente analizadas, mostrando que el ferrocarril es mucho más conveniente bajo esas consideraciones.

Particularmente, la preocupación por el cambio climático que se ha manifestado en todo el mundo en la primera década del siglo XXI ha atraído la atención de los planificadores del transporte para buscar formas de mejorar la eficiencia del movimiento terrestre de carga, dada la relevancia que éste tiene en la generación de gases de efecto invernadero. La recomposición del reparto modal autotransporte-ferrocarril resulta entonces de gran importancia para los objetivos de saneamiento del medio ambiente, tanto en México como en el resto del mundo.

Desde la perspectiva práctica del reparto modal, sin embargo, las ventajas competitivas de cada modo de transporte tienen un peso importante en las decisiones de los embarcadores para mover sus cargas. Las cargas con alto valor económico, los embarques de poco tonelaje o los productos perecederos difícilmente dejarán de moverse por autotransporte; en cambio, los movimientos de gran tonelaje o los productos de bajo valor económico son típicamente transportados por ferrocarril.

En este capítulo se revisa el comportamiento del reparto modal carretera-ferrocarril del transporte de carga en diversos países desarrollados, para lograr una panorámica de los rangos de porcentajes del reparto modal que se observan en la práctica actual en ese tipo de países.

3.1 Situación en EE. UU.

El transporte terrestre de carga en los Estados Unidos se hace por carretera, ferrocarril y ductos. El movimiento de carga estadounidense, que suele fluctuar con la actividad económica, se ha mantenido estable desde finales de 2011, mostrando una tendencia a recorrer distancias cada vez mayores debido a la existencia de cadenas de suministro entre socios muy distantes.

En 2012, el sistema de transporte de carga estadounidense movió un promedio diario de 54 millones de toneladas, con un valor aproximado de 48 mil millones de dólares (BTS, 2012; BTS, 2014). El reparto modal de la carga terrestre para los

años 2007, 2011 y 2012, junto con una proyección para el año 2040 se muestran en las figuras 3.1 y 3.2 para tonelaje movido y para valor de la carga, respectivamente.

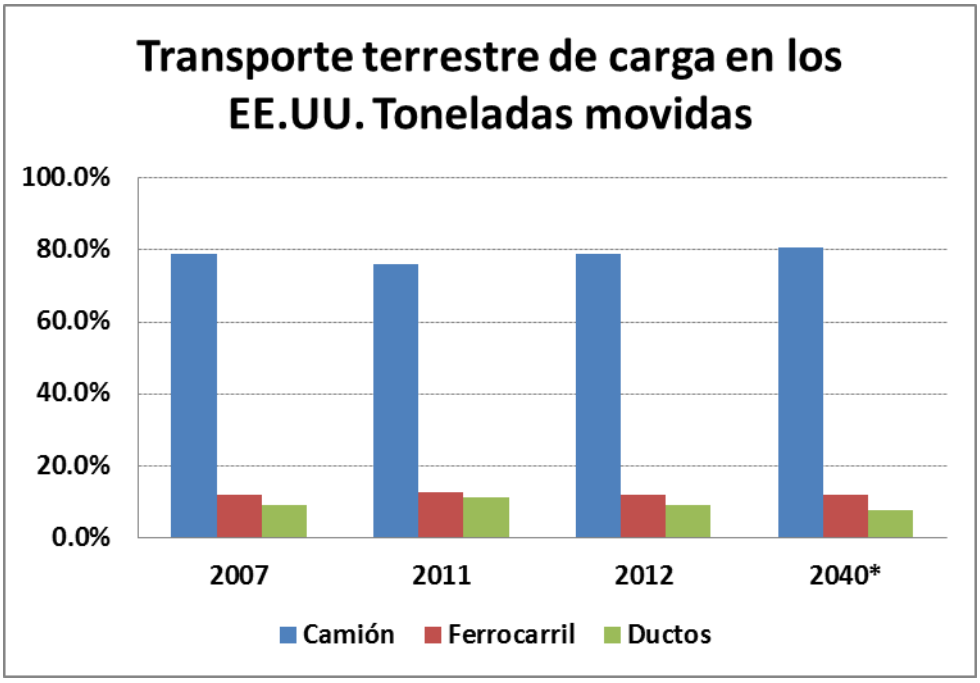


Figura 3.1. Reparto modal de toneladas de carga en los EE. UU. (BTS, 2014)

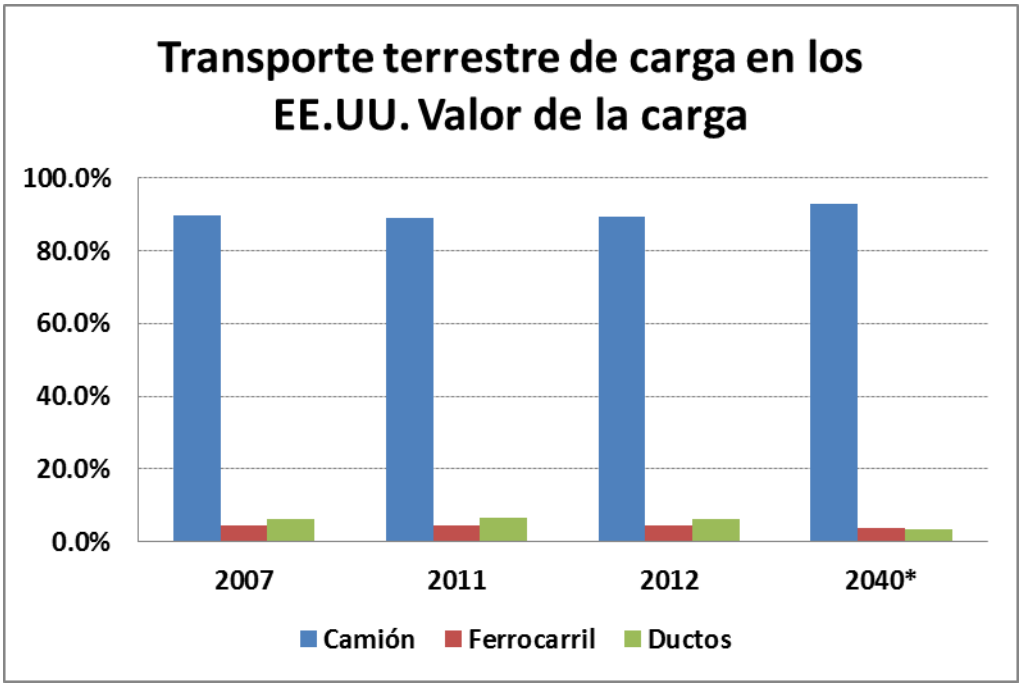


Figura 3.2. Reparto modal del valor de la carga en los EE. UU. (BTS, 2014)

En el movimiento de toneladas, la participación modal promedio 2011-2012 es de aproximadamente 77.4% para el autotransporte, 12.4% para el ferrocarril y 10.2% para ductos. La proyección para el año 2040 es de 80.6% para autotransporte, 11.9% para ferrocarril y 7.5% para ductos.

En cuanto al valor de las cargas movidas (datos originales en miles de millones de dólares de 2007), la participación modal promedio 2011-2012 es de aproximadamente 89.3% para el autotransporte, 4.4% para el ferrocarril y 6.4% para ductos. La proyección para el año 2040 es de 92.8% para autotransporte, 3.9% para ferrocarril y 3.4% para ductos.

En el caso particular de los movimientos a través de la frontera México-Estados Unidos, la información sobre tonelajes que cruzan la frontera no está disponible para los movimientos en ambos sentidos norte-sur y viceversa, pues los registros estadounidenses solamente capturan información de los tonelajes que entran a su territorio y no los que salen hacia México (BTS, 2015).

El reparto modal en el que se considera el valor de las cargas movidas se muestra en las siguientes figuras. La figura 3.3 muestra el reparto modal para los movimientos de Estados Unidos a México en los años 2000, 2005, 2011 y 2012 (BTS, 2014).

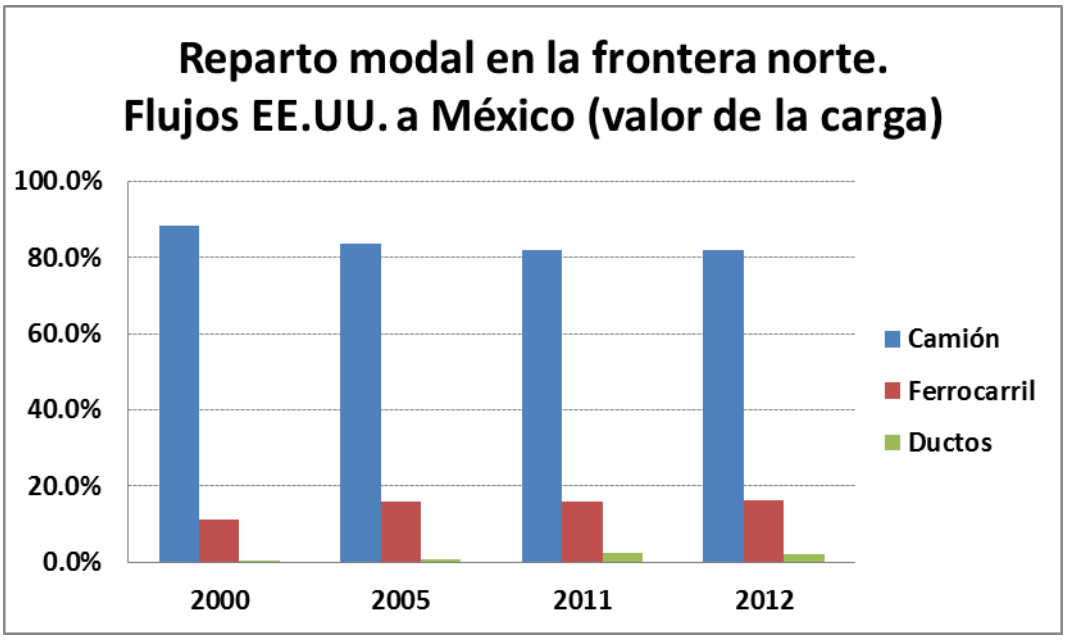


Figura 3.3. Reparto modal respecto al valor de la carga movida. Flujos de carga de Estados Unidos a México (BTS, 2014).

Los valores promedio de la participación modal para 2011 y 2012 son de 81.9% para el autotransporte, 16% para el ferrocarril y 2.1% para ductos.

La figura 3.4 muestra el reparto modal correspondiente a los movimientos de carga de México hacia Estados Unidos. Los porcentajes promedio 2011-2012 en este caso son de 83.4% para el autotransporte, 16.5% para el ferrocarril y 0.1% para ductos.

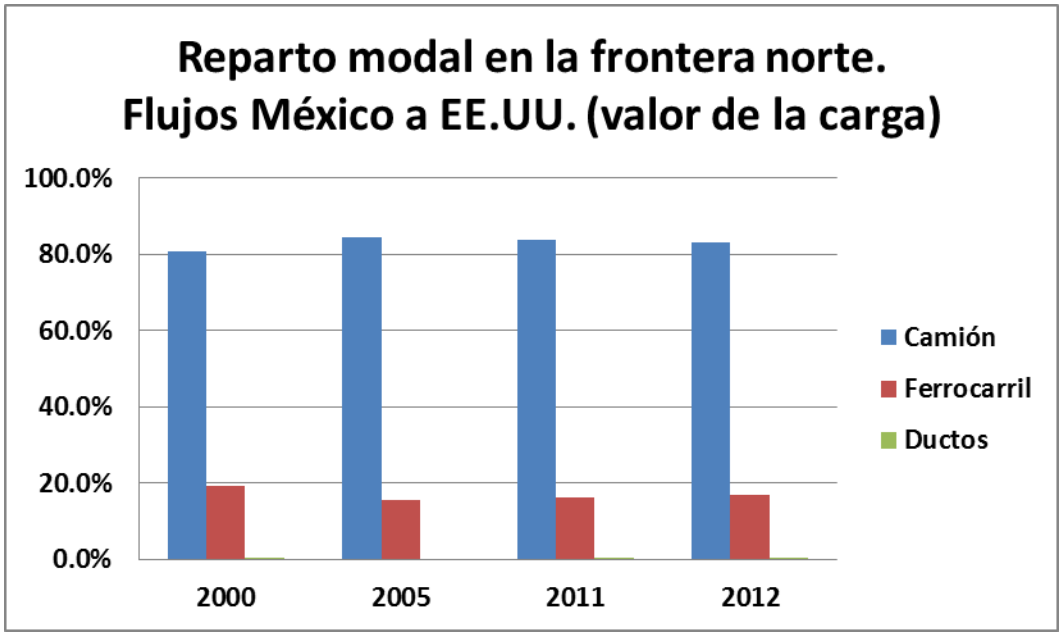


Figura 3.4. Reparto modal respecto al valor de la carga movida. Flujos de carga de México a Estados Unidos (BTS, 2014).

Las figuras 3.1 y 3.2 muestran un fuerte dominio del transporte carretero en el movimiento de carga estadounidense, y la continuación de esta tendencia en las proyecciones para el año 2040, así como en el reparto modal en cuanto a valor de la carga que cruza la frontera norte. Esta predominancia del autotransporte respecto al ferrocarril y al transporte por ducto es mucho más marcada en relación con el valor de la carga transportada, que en relación con los tonelajes movidos, lo que confirma la vocación tradicional del ferrocarril para transportar mercancías de bajo valor económico y alto peso específico.

Con base en las proyecciones para el año 2040 se prevé un crecimiento de la predominancia del autotransporte sobre los otros modos de transporte, que en principio podría llegar a ser de aproximadamente 81% en tonelajes y del 93% en cuanto a valor de la carga, dejando bastante atrás a los otros dos modos de transporte terrestre.

3.2 Situación en Canadá

El transporte terrestre de carga en Canadá se realiza principalmente por carretera y ferrocarril. En 2011, el sistema nacional de carreteras canadiense movió

aproximadamente 18,000 millones de vehículos-kilómetros en el transporte de carga, que representó una reducción de cerca del 3.5% respecto de los movimientos en 2010. Por su parte, en 2012 los ferrocarriles canadienses movilizaron 336.5 millones de toneladas, lo que significó un aumento de 8.6 millones de toneladas respecto a los movimientos de 2011.

En el movimiento transfronterizo, el valor de la carga movida en ambos sentidos Canadá-Estados Unidos fue aproximadamente de 605,000 millones de dólares canadienses, de los cuales el 55% fue transportado por carretera (Transport Canada, 2014a).

El reparto modal de las toneladas movidas en el transporte terrestre canadiense se muestra en la figura 3.5; el dato de 2012 es preliminar.

L

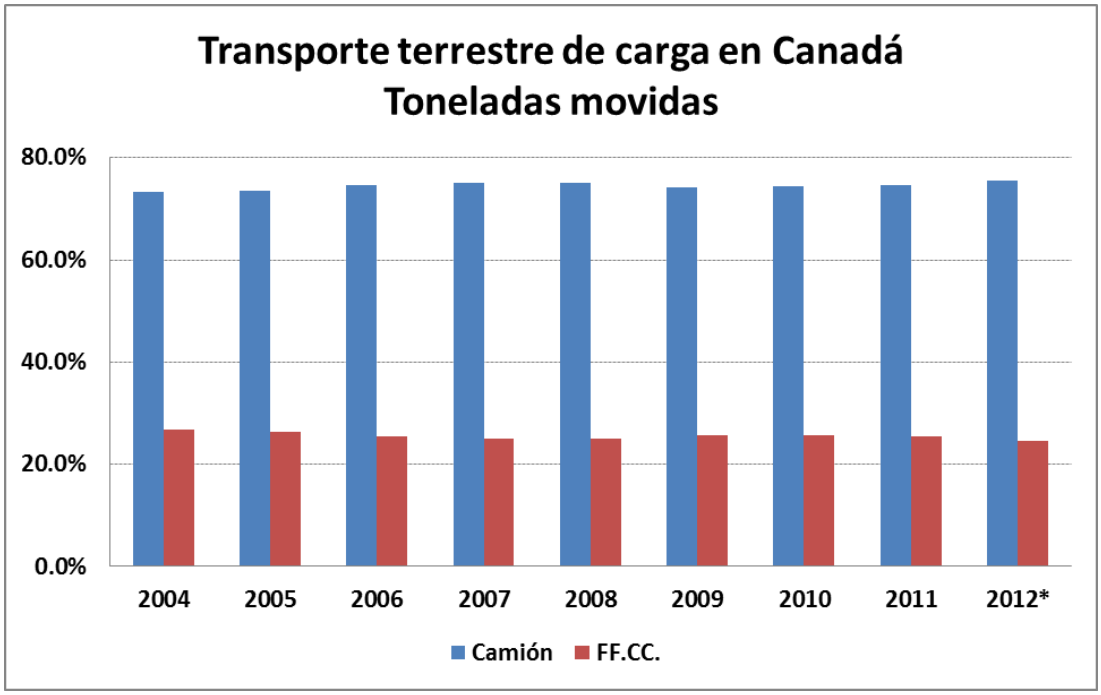


Figura 3.5. Reparto modal de las toneladas de carga terrestre en Canadá (Transport Canada, 2014b).

Los valores promedio 2004-2012 para el reparto modal de las toneladas movidas por tierra es de 74.4% para el autotransporte y 25.6% para el ferrocarril.

En la generación de toneladas-kilómetro, la figura 3.6 muestra el reparto modal entre autotransporte, ferrocarril y modo marítimo.

En cuanto al comercio internacional, el reparto modal carretera-ferrocarril para exportaciones e importaciones se muestran en las figuras 3.7 y 3.8; el dato 2013 es preliminar.

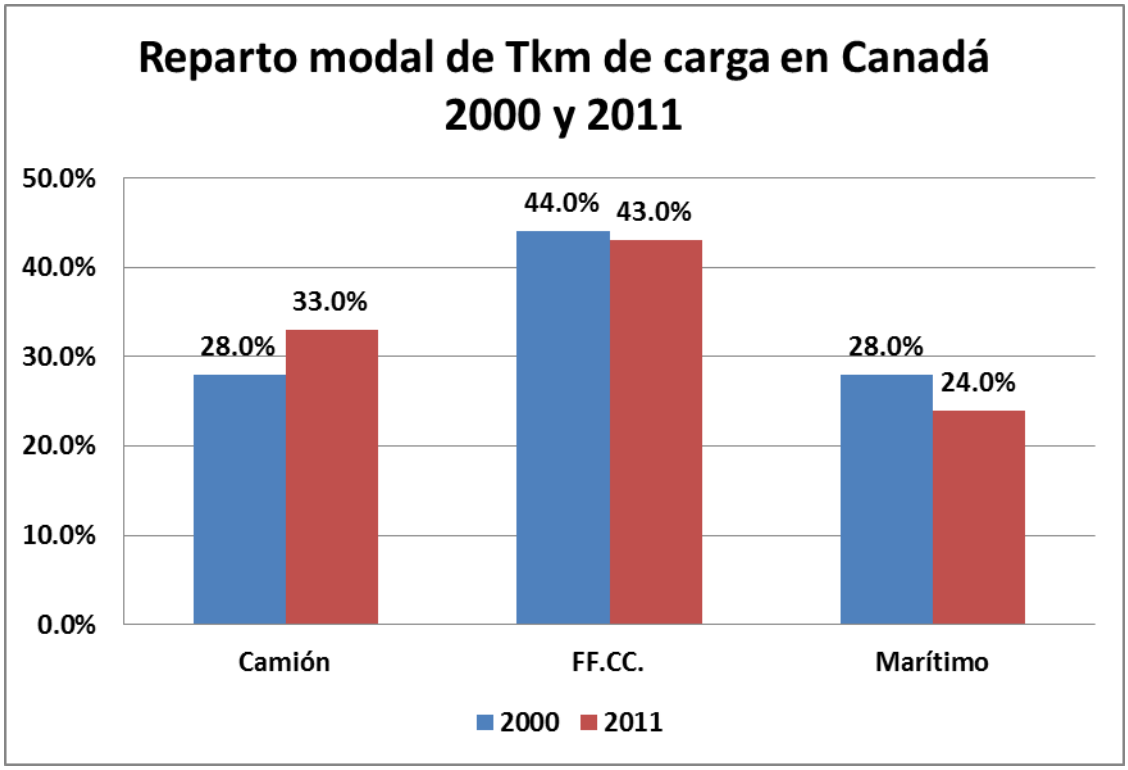


Figura 3.6. Reparto modal de las toneladas-kilómetro de carga en Canadá, 2000 y 2011 (Transport Canada, 2014b).

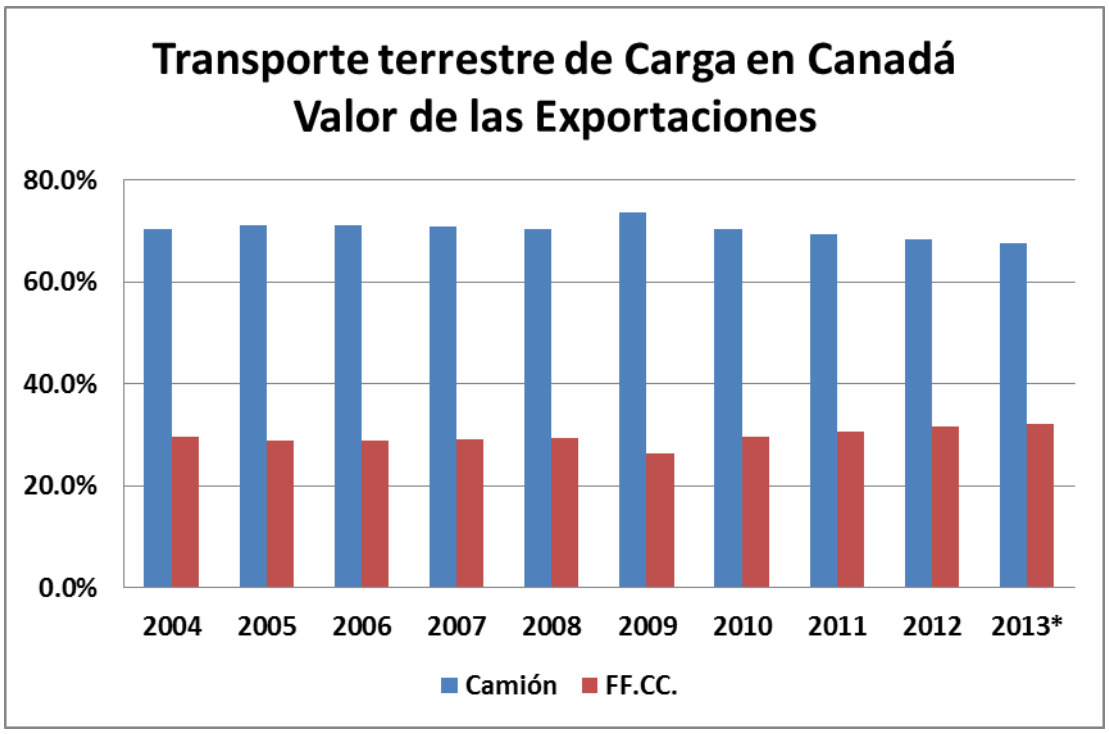


Figura 3.7. Reparto modal del valor de la carga terrestre en exportaciones canadienses (Transport Canada, 2014b).

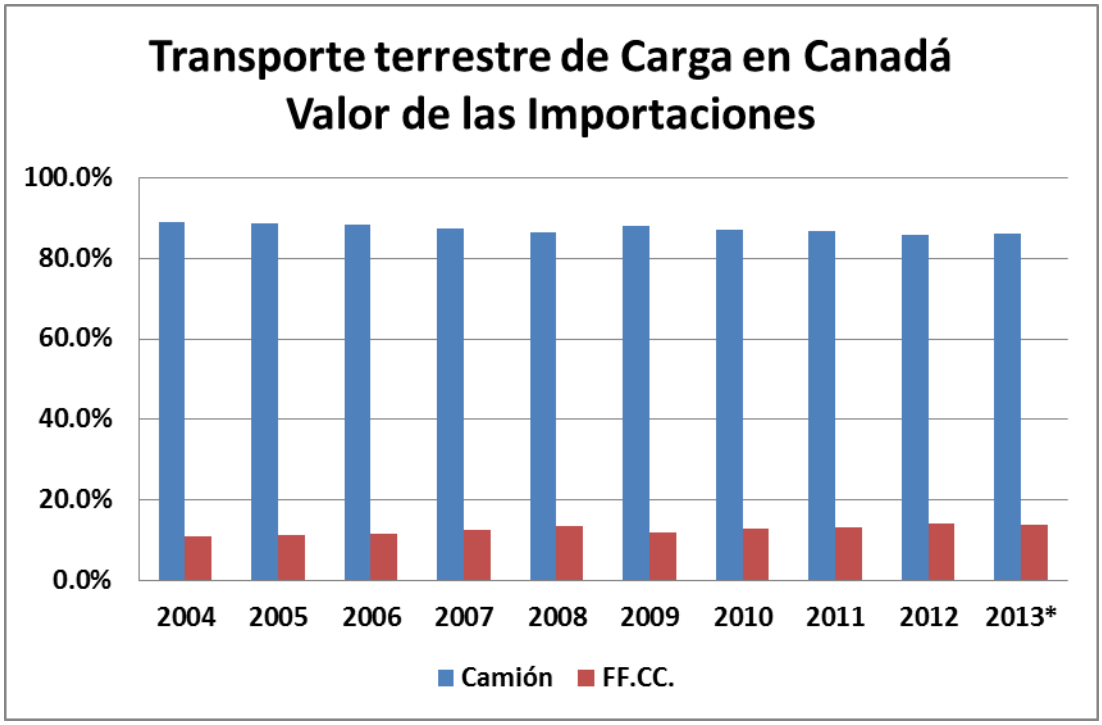


Figura 3.8. Reparto modal del valor de la carga terrestre en importaciones canadienses (Transport Canada, 2014b).

El valor promedio 2004-2013 del reparto modal del valor de las exportaciones canadienses en el transporte terrestre es de 70.3% para el autotransporte y de 29.7% para el ferrocarril.

Para el valor de las importaciones canadienses en el transporte terrestre de carga, los porcentajes promedio de reparto modal son de 87.5% para el autotransporte y 12.5% para el ferrocarril.

Las cifras presentadas muestran que en Canadá el ferrocarril tiene una participación mucho más relevante que en los EE. UU.

3.3 Situación en Europa

La Unión Europea (UE) inició en 1957 con seis países y se ha extendido para agrupar 28 estados, con la anexión de Bulgaria y Rumania en 2007, y Croacia en 2013.

Estos 28 países colaboran para mantener las redes carretera y ferroviaria transeuropeas que los comunican entre sí, buscando promover repartos modales que favorezcan el transporte sustentable, al mismo tiempo que se apoya al crecimiento económico.

En 2006, el reparto modal del transporte de carga en la UE-25 (con 25 miembros) fue del 44% para autotransporte, 10% para ferrocarril y 39% para transporte marítimo, lo que significó 81.5% del transporte terrestre para el modo carretero y 18.5% para el ferrocarril (Larsson, M., 2009).

La evolución del transporte de carga en la UE en el periodo 2000-2012 se muestra en la figura 3.9; los porcentajes son respecto a las toneladas-kilómetros producidas en el transporte terrestre de carga.

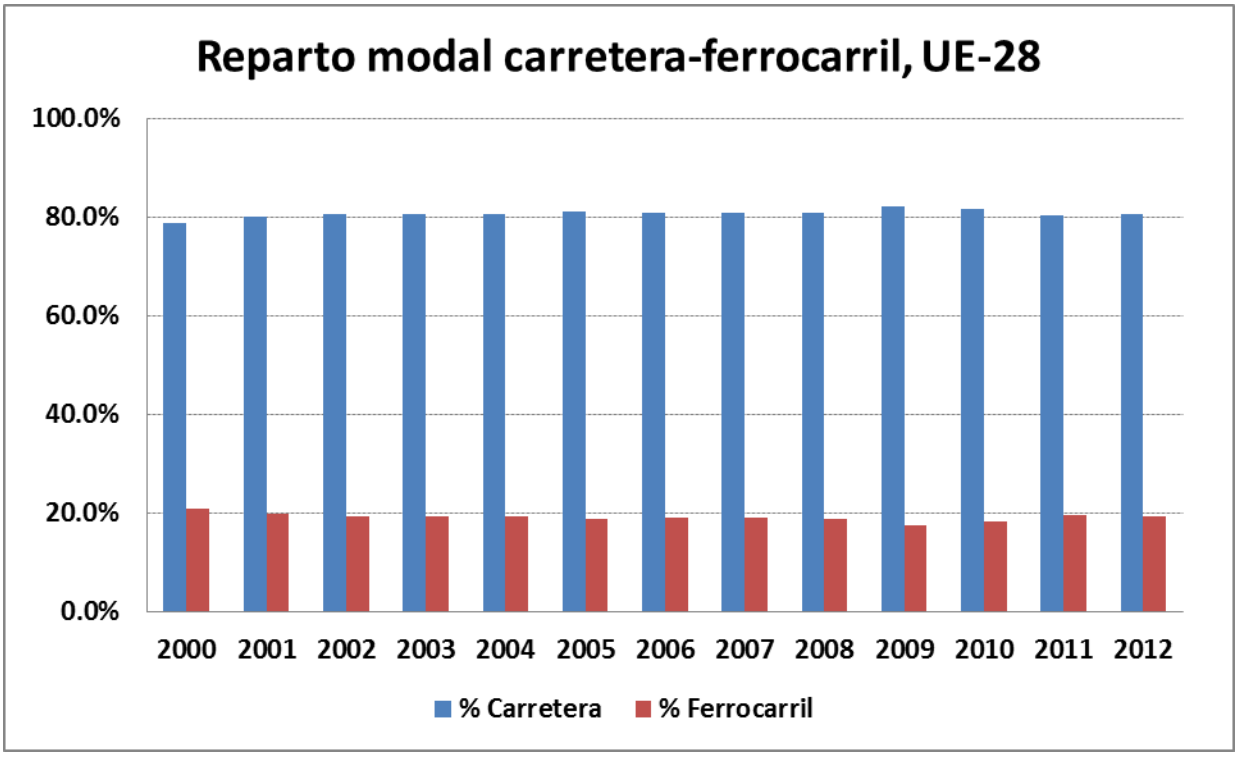


Figura 3.9. Reparto modal respecto ton-km en la Unión Europea-28 (EEA, 2015).

Las participaciones porcentuales promedio 2000-2012 resultan de 80.8% para el modo carretero y 19.2% para el modo ferroviario.

Los porcentajes de reparto modal mostrados en la figura 3.9 representan los movimientos globales en las redes carreteras y ferroviaria transeuropeas completas. Estos porcentajes de participación son distintos en cada país de la UE y varían según las circunstancias geográficas, económicas y operativas de cada uno.

El movimiento doméstico de carga en la UE puede ocurrir en tres modos principalmente: carretera, ferrocarril o vías interiores navegables. Los repartos modales de la carga varían dependiendo de la disponibilidad de estos modos en los distintos países. Las figuras 3.10 y 3.11 muestran estos repartos modales.

La figura 3.10 muestra los repartos modales entre ferrocarril, vías interiores navegables y carretera para los países de la UE-28 que cuentan con estos tres modos de transporte.

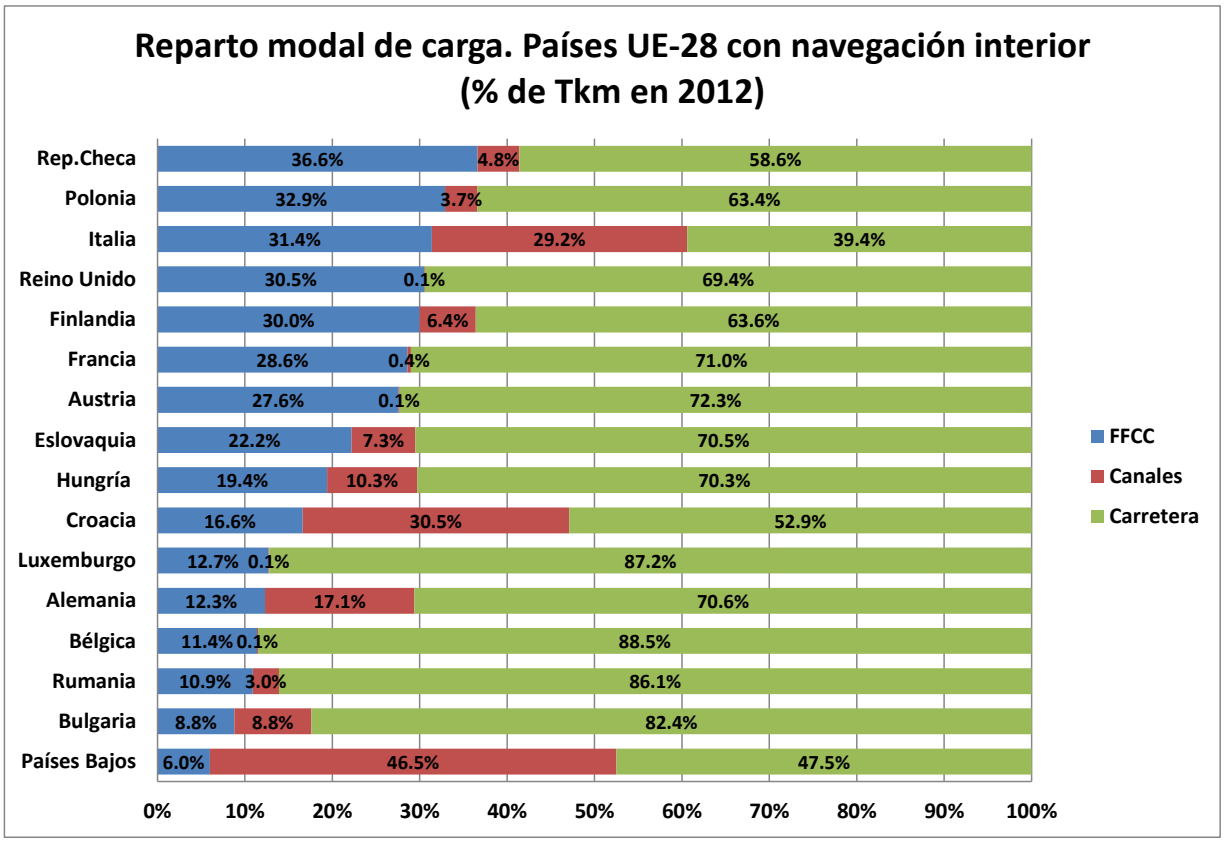


Figura 3.10. Reparto modal respecto ton-km 2012. Países EU-28 con navegación interior (European Commission, 2015).

Los porcentajes de participación del ferrocarril cubren un rango que va desde el 36.6% en la República Checa hasta el 8.8% en Bulgaria.

Es notable la participación del transporte por navegación interior en Italia y Croacia, con valores de cerca del 30%, y particularmente de los Países Bajos, que llega hasta el 46.5%, en donde el ferrocarril reduce su participación a un 6 por ciento.

La figura 3.11 muestra los repartos modales ferrocarril-autotransporte para los países de la UE-28 que carecen de vías interiores navegables y solamente utilizan autotransporte y ferrocarril para el movimiento de carga.

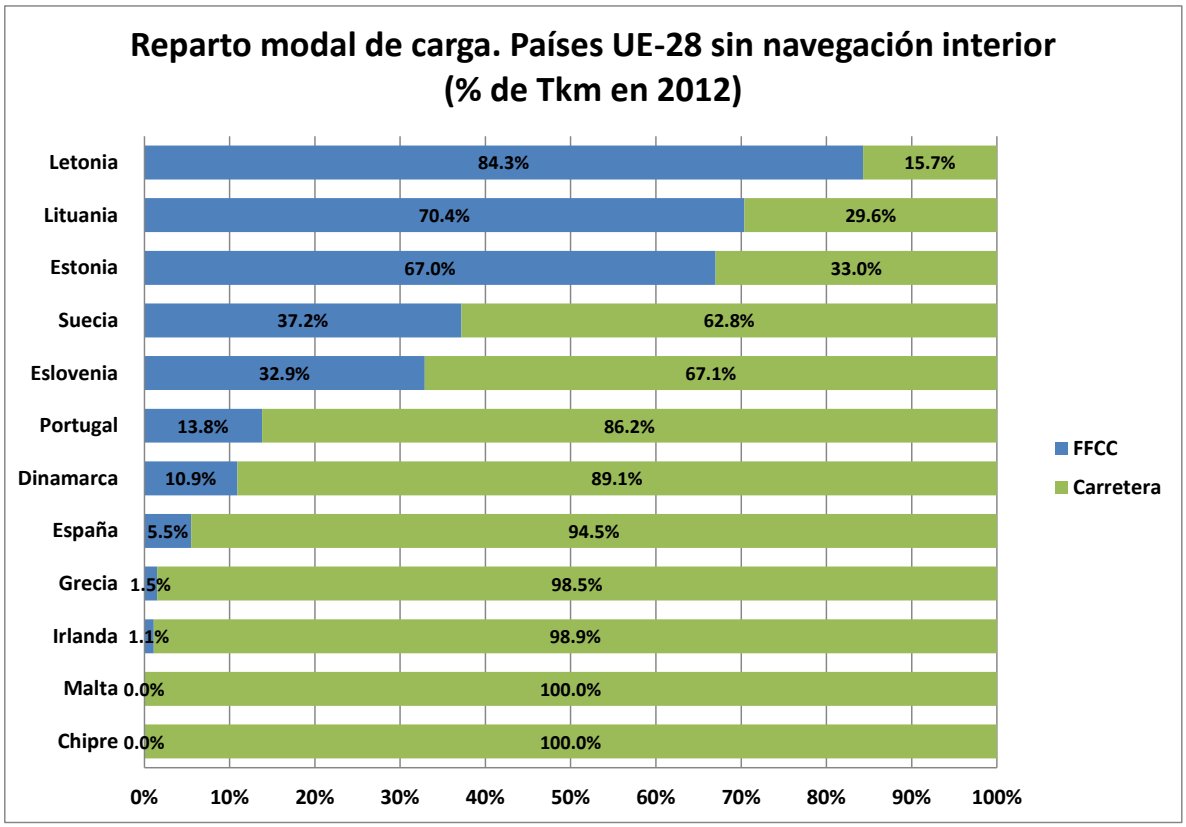


Figura 3.11. Reparto modal respecto ton-km 2012. Países EU-28 que no cuentan con navegación interior (European Commission, 2015).

En la figura 3.11 los porcentajes de participación ferroviaria se presentan en un rango más amplio que los mostrados en la figura 3.10: desde un 84.3% en Letonia hasta un mínimo de 1% en Irlanda. El caso particular de Malta y Chipre, con 0% de participación ferroviaria, resulta claro por la total ausencia del servicio ferroviario en esos estados.

La figura 3.12 muestra la distribución por modo de transporte de los movimientos de carga doméstica en las principales potencias económicas a escala global. Los modos de transporte utilizados son los ductos, navegación interior, ferrocarril y autotransporte. Japón es la excepción, pues no cuenta con transporte por ductos, ni navegación interior.

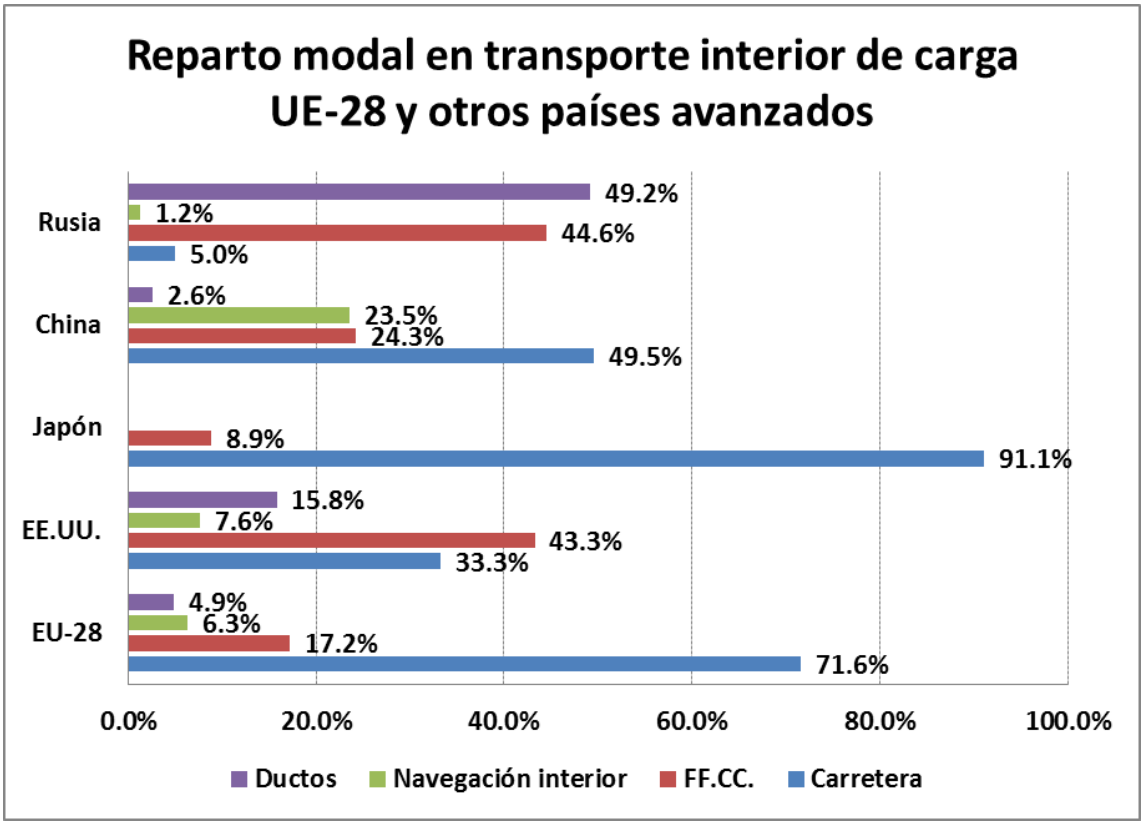


Figura 3.12. Comparaciones del reparto modal en el movimiento doméstico de carga Unión Europea-28 y EE. UU., Japón, China y Rusia. (European Commission, 2015).

En la gráfica anterior se observan profundas diferencias y sólo algunas pocas coincidencias entre los países analizados. La mayor coincidencia se encuentra en la proporción de uso del ferrocarril en los EE. UU. y Rusia, ambos países con una gran extensión territorial, aunque con formas de organización económica y sistemas tecnológicos no muy similares.

Sin duda, Japón es un caso atípico entre las potencias económicas, al movilizar más del 90% de su carga doméstica por autotransporte y muy poco por ferrocarril; como ya se mencionó, no utiliza ductos, ni canales de navegación. Es posible que su condición insular (archipiélago), con una orografía agreste explique en cierta medida la distribución modal de la carga; sin embargo, el notable desarrollo de los ferrocarriles de pasajeros y la dependencia absoluta de fuentes externas para el abastecimiento de combustibles fósiles contradice en cierta medida el razonamiento anterior y tal vez explique la pérdida de competitividad en productos manufacturados de bajo valor ante países como China e India.

En la citada figura 3.12 se observa que las potencias con un balance más desequilibrado en su distribución modal son Japón, la Unión Europea y China, en menor medida; en cambio, la potencia con mayor equilibrio son los EE. UU.

En el caso de Rusia es muy notable el uso de las vías interiores de navegación y el ferrocarril, que en conjunto suman el 94% del total. Es muy probable que Rusia sea la potencia mundial con un transporte de mercancías menos caro y contaminante, a diferencia de Japón, aunque aún queda por analizar el tipo de productos que cada potencia transporta de manera mayoritaria, pues es de suponer que Rusia mueve grandes cantidades de productos pesados y voluminosos, mientras que Japón tal vez transporte más productos con elevada densidad económica.

3.4 Consideraciones sobre el reparto modal carretera-ferrocarril

El reparto modal en el transporte de carga es un tema de interés en la planeación del transporte en todo el mundo, y en particular para las políticas de desarrollo sostenible que han cobrado relevancia desde finales del siglo XX.

La División de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (DDS) ha definido el indicador Reparto Modal del Transporte de Carga (*Modal Split of Freight Transport*) como:

El porcentaje de participación de cada modo (carretera, ferrocarril y navegación interior) en el movimiento total de carga doméstico, medido en toneladas-kilómetro).

La relevancia de este indicador para el desarrollo sostenible reside en el consenso general de que el transporte carretero es energéticamente menos eficiente y genera más emisiones contaminantes por tonelada-kilómetro que el ferrocarril o que la navegación interior, y por tanto surge la necesidad de nuevas políticas que alienten el uso del transporte ferroviario o el transporte por navegación interior que son más amigables con el medio ambiente (UN-DSD, 2015).

En los países con economías de mercado, es un hecho que la sola consideración de que el ferrocarril es más eficiente en el uso de la energía y más amigable con el ambiente no basta para inducir transferencias de carga del modo carretero hacia el modo ferroviario. Los aspectos económicos, operativos y regulatorios de cada modo determinan en gran medida las posibilidades de dicha transferencia.

El modo carretero se caracteriza por tener un servicio puerta-a-puerta confiable, con buena visibilidad (capacidad de rastrear el embarque y estimar el tiempo de llegada), alta velocidad y generalmente a un precio mayor que el del ferrocarril.

El modo ferroviario se caracteriza por manejar a bajo costo el servicio de terminal a terminal, generalmente a velocidades y confiabilidad[1] más bajas, aunque los ferrocarriles están mejorando en esas áreas. Históricamente, la mayor ventaja del ferrocarril sobre el autotransporte radica en su gran capacidad y menor costo por unidad de carga.

Un servicio ferroviario con costos menores que el autotransporte, combinado con puntualidades y mermas de carga comparables con las del autotransporte, puede ser extremadamente competitivo con este último, aun cuando su velocidad no sea equiparable (US-DOE, 2013).

No todos los movimientos del autotransporte, sin embargo, son susceptibles de transferirse al ferrocarril. Un factor clave que limita la transferencia es la distancia de recorrido de los embarques. Sólo algunos servicios ferroviarios son competitivos con el autotransporte en distancias cortas; por ejemplo, los movimientos de carga a granel en trenes unitarios, pero, en general la mayor competitividad del ferrocarril se presenta en las grandes distancias.

Las cargas que se mueven en tiempos menores a un día históricamente se han llevado por autotransporte y corresponden a distancias de cerca de 800 km. Una excepción a esto es el movimiento de cargas muy pesadas que sólo se mueven por ferrocarril, como el carbón o los minerales, que van desde las minas hacia puertos o plantas industriales.

El movimiento intermodal con distancias mayores a 800 km es un mercado atractivo para la transferencia carretera-ferrocarril. Permite a los clientes mover cargas en distancias largas por ferrocarril (ahorrando así pagos a conductores) y utilizar el camión en los tramos cortos en el origen y en el destino del movimiento, sin necesidad de desconsolidar los contenedores utilizados.

Otros tipos de vehículos automotores como los camiones cisterna para líquidos, los camiones-tolva para granel o los camiones con plataforma pueden moverse en ferrocarril con el sistema *roll-on/roll-off* (Ro-Ro), en el cual los camiones se suben a plataformas del ferrocarril y entregados en terminales cercanas a su destino (US-DOE, 2013).

Distintos tipos de terminales, equipo y servicios se requieren para manejar los diferentes tipos de camiones. Los sistemas Ro-Ro pueden incluir la separación del tren en varios segmentos para permitir múltiples puntos de carga y descarga: proceso conocido como *tecnología abierta*.

La tecnología abierta se diseñó originalmente para hacer al ferrocarril más competitivo frente al autotransporte en movimientos de distancias cortas, al reducir

[1] Entendiendo por mayor confiabilidad una menor variabilidad en los tiempos de servicio.

los tiempos de carga y descarga y con ello ofrecer velocidades competitivas entre origen y destino. Las operaciones en el sistema Ro-Ro son más comunes en Europa que en Norteamérica, por tres razones básicas: las menores distancias que recorren los embarques y la alta congestión carretera en Europa; las grandes distancias y un autotransporte muy competitivo en los Estados Unidos; y un servicio mucho más económico y eficiente en largo itinerario con el uso de doble estiba en los Estados Unidos.

El sistema de tecnología abierta fue introducido en la década de los años 1990 por la empresa estadounidense CSX, con el nombre de “Carretera de Hierro” (*Iron Highway*), y maneja trenes compuestos de plataformas y múltiples locomotoras en distintos puntos del convoy, de modo que el tren pueda separarse en múltiples partes. De esta manera, los camiones y sus cajas se suben y bajan a las plataformas del tren en rampas colocadas en los puntos de separación.

La empresa canadiense Canada Pacific Railway (CPR) implantó esta tecnología con la adquisición de equipo de CSX y comenzó a ofrecer un servicio llamado Express Way entre Montreal y Toronto en 2006. Para 2013, CPR tenía cinco terminales (Montreal, Windsor, Detroit y dos más en Toronto), moviendo dos trenes al día en cada dirección, seis días a la semana con hasta 90 plataformas por tren. Sus reportes de rendimiento han registrado tiempos típicos de carga de menos de una hora para un tren de 90 carros (US-DOE, 2013).

Independientemente de la distancia, el servicio o la tecnología ferroviaria, hay ciertos tipos de carga para los cuales el ferrocarril no puede competir. Ciertos fabricantes de automotores, por ejemplo, insisten en utilizar autotransporte debido a los requerimientos particulares del manejo de esas cargas; embarcadores que son muy sensibles a las demoras requieren de la gran flexibilidad que ofrece el autotransporte, y algunas cargas a granel podrían necesitar moverse en pequeñas cantidades o llegar a destinos que no alcanza el ferrocarril.

Adicionalmente, mejoras a la infraestructura podrían necesitarse para hacer más competitivo al ferrocarril frente al autotransporte en algunos corredores. Muchas líneas ferroviarias tienen reducciones de velocidad significativas, y sin una mejora de esto no podrían competir con el autotransporte en el movimiento de cargas a distancias cortas o medias. Del mismo modo, uno de los principales retos es eliminar las obstrucciones a la altura de los trenes que impiden el servicio intermodal de doble estiba.

Muchas empresas ferroviarias y gobiernos están preparando agendas y estrategias para mejorar al ferrocarril e inducir la transferencia de carga desde el modo carretero. La Comisión Europea (CE) ha publicado en sus documentos de política la meta de lograr transferir el 30% de la carga carretera en distancias promedio de 300 km hacia el ferrocarril en el año 2030. Para lograr esto, la CE concluye que debe desarrollarse la infraestructura adecuada con base en la inversión y la innovación, aunque no ha especificado el detalle de las inversiones necesarias.

Están, sin embargo, los programas europeos Marco Polo I y II, que ofrecen subsidios a empresas privadas capaces de aportar soluciones de transporte que generen el cambio modal, con un significativo presupuesto dedicado a la transferencia carretera-ferrocarril (US-DOE, 2013).

4 Modelación de escenarios con el modelo ajustado

Una vez ajustada la matriz OD de flujos carreteros, que se basó en información OD de 2010, los datos del modelo se completaron con la información OD correspondiente del movimiento ferroviario del mismo año.

Esta información de movimientos ferroviarios proviene de las empresas operadoras que la comparten con la Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal de la SCT (DGTFM) y, por su carácter confidencial, está un poco más restringida. Sin embargo, gracias a la colaboración del IMT con el Comité Técnico Especializado de Información Económica y Operativa del Sector Transporte de trabajo conjunto SCT-INEGI se ha podido obtener la parte operativa de los movimientos de carga ferroviarios para los años 2010 a 2012.

En este capítulo se muestran los resultados de la modelación considerando primero el comportamiento de las redes carretera y ferroviaria por separado, para luego estimar el comportamiento conjunto de estas redes en una sola red bimodal que se conecta en los puntos que representan terminales o estaciones con intercambio de carga.

4.1 Modelado de las redes unimodales

El modelado de asignación en cada una de las redes se hizo considerando los flujos de vehículos en las mismas. A fin de tener consistencia en el manejo de esta información, se decidió utilizar vehículos o carros de ferrocarril para poder calibrar la matriz OD carretera con los correspondientes datos de TDPA.

En el caso de los carros de ferrocarril, éstos se tomaron de los datos proporcionados por la DGTFM. Para hacer equivalentes los carros de ferrocarril, reportados en la tabla OD, con los conteos vehiculares de los flujos carreteros, se dividió el número de carros de ferrocarril entre 365 días.

Las tablas 4.1 y 4.2 muestran el número total de vehículos resultante de la estimación de la matriz OD carretera y de la división entre 365 de los carros de ferrocarril, respectivamente.

Tabla 4.1 Cantidad total de vehículos estimados que circulan en promedio diariamente por las carreteras federales (elaboración propia)

Tipo de vehículo	Tipo de producto	Total de unidades
C2	Todos	25,083.97
C3	Todos	21,082.45
T3S2	Todos	33,826.29
T3S3	Todos	8,415.91
T3S2R4	Todos	12,144.22
TOTAL		**100,552.84**

Tabla 4.2 Cantidad total de carros de ferrocarril estimados que circulan en promedio diariamente por las vías férreas (elaboración propia)

Tipo de vehículo	Tipo de producto	Total de unidades
Carro	Contenedores	1,490.27
Carro	Graneles Agrícolas	894.14
Carro	Graneles Minerales	889.9
Carro	Equipo ferroviario	14.22
Carro	Hierro, Acero y sus derivados	366.66
Carro	Petrolíferos	235.25
Carro	Productos forestales	50.18
Carro	Productos industriales	641.57
Carro	Productos químicos	259.63
Carro	Vehículos automotores	512.52
Carro	Otros	39.24
TOTAL		**5,393.58**

Considerando la mayor libertad que tienen los usuarios de la carretera para elegir sus rutas en comparación con el manejo controlado de los movimientos en la red ferroviaria, el modelo de asignación aplica el criterio de Equilibrio del Usuario (EU) en la red carretera y el criterio todo-o-nada en la red ferroviaria.

La impedancia modelada corresponde solamente a los tiempos de recorrido, y los aspectos de congestión en la red carretera se representaron con una función BPR, para lo cual se utilizaron parámetros α y β estimados para las carreteras mexicanas, como se indica en la tabla 4.3. Estos parámetros se discutieron en un trabajo previo sobre funciones volumen-demora (Moreno, Rico y Bustos, 2014).

Tabla 4.3 Parámetros α y β propuestos para la función BPR (con base en Moreno, Rico y Bustos, 2014)

	Autopistas		Libres de peaje	
Coeficiente	100 km/h	80 km/h	100 km/h	80 km/h
α	0.83	0.56	0.83	0.71
β	5.5	3.6	2.7	2.1

Con los supuestos ya descritos, los dos primeros escenarios modelados fueron:

1. Asignación de vehículos automotores, por la red carretera, restringiendo el paso hacia la red ferroviaria.
2. Asignación de carros de ferrocarril, por la red ferroviaria, restringiendo el paso hacia la red carretera.

Las figuras 4.1 y 4.2 muestran las asignaciones de flujo en estos dos escenarios.

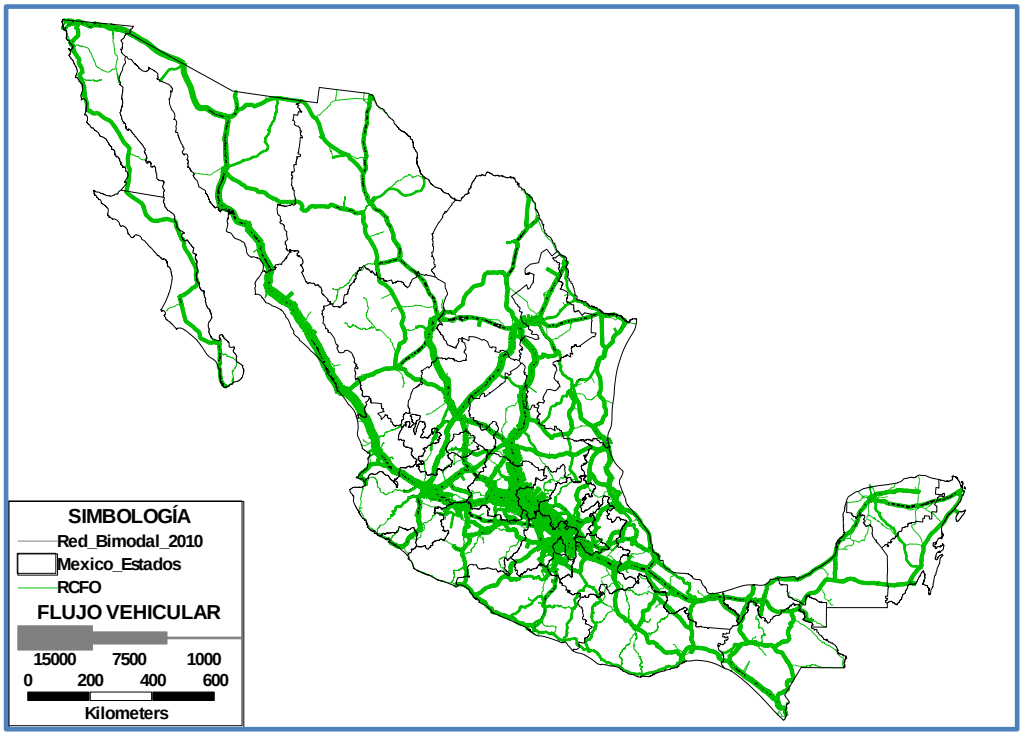


Figura 4.1. Asignación de flujos en carretera, sin paso hacia la red ferroviaria con el criterio de asignación de equilibrio del usuario (elaboración propia).

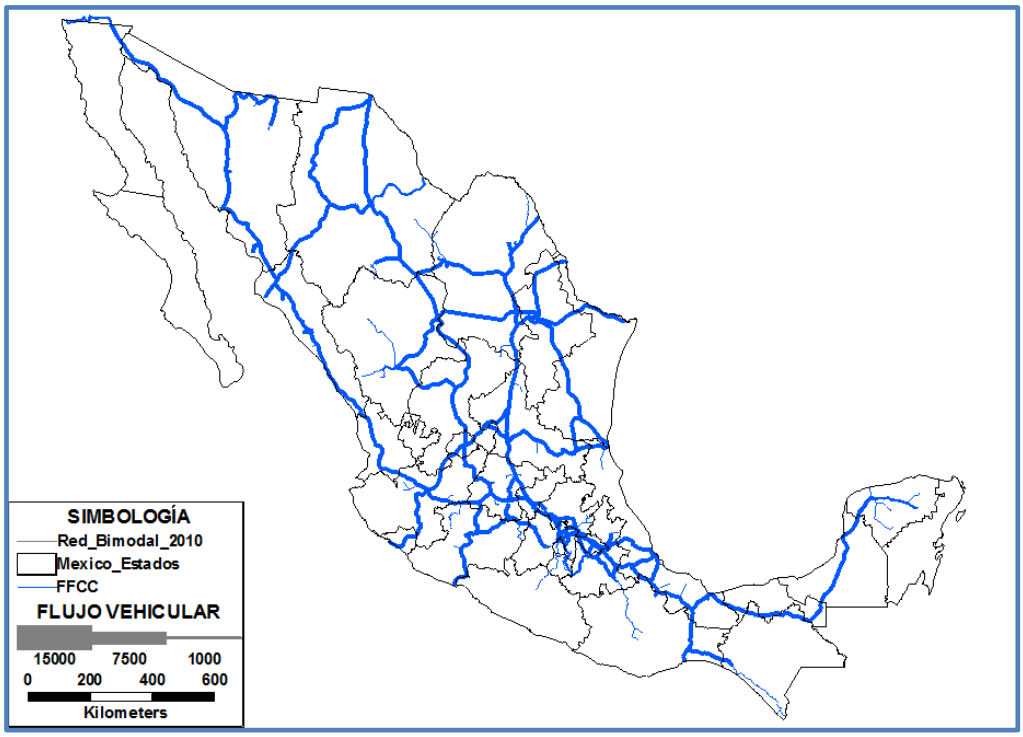


Figura 4.2. Asignación de flujos en la red ferroviaria, sin paso hacia la carretera con el criterio de asignación todo o nada (elaboración propia).

De manera muy general, las asignaciones observadas en las figuras 4.1 y 4.2, muestran mayores flujos en la red carretera que en la red ferroviaria, como se aprecia por el grosor de las líneas de flujo en ambos mapas, considerando que las escalas de representación son las mismas.

Este primer ejercicio de asignación permitió verificar la operatividad del modelo y dar una idea básica del comportamiento de las redes de manera individual.

En la sección siguiente se muestran los resultados de considerar la red bimodal que representa la operación conjunta de la red carretera y la ferroviaria, con intercambios de carga entre ellas, que es un escenario más realista para modelar la interacción de ambos modos en el reparto modal de la carga en el país.

4.2 Modelado de la red bimodal

El modelado de la red bimodal se efectuó incluyendo nodos que representan terminales intermodales o terminales ferroviarias donde se realizan transferencias de carga carretera-ferrocarril y viceversa. Un total de 43 estaciones de intercambio, que representan los puntos principales en la red, se modelaron como nodos de transferencia (Moreno E., O. Rico, A. Bustos, C. Martner y R. Montoya, 2014).

En la figura 4.3 se muestra el resultado de la asignación de flujos en la red bimodal con bloqueo de transferencia de carga entre las redes; esencialmente es el mismo resultado que se observa en las redes por separado de las figuras 4.1 y 4.2, pero en el contexto de la red bimodal.

En este ejercicio de asignación se pudo verificar el adecuado funcionamiento de la red bimodal manejando las matrices OD de ambos modos de manera conjunta, además de poder representar el estado pronosticado de los flujos suponiendo que no hay transferencia de carga entre modos.

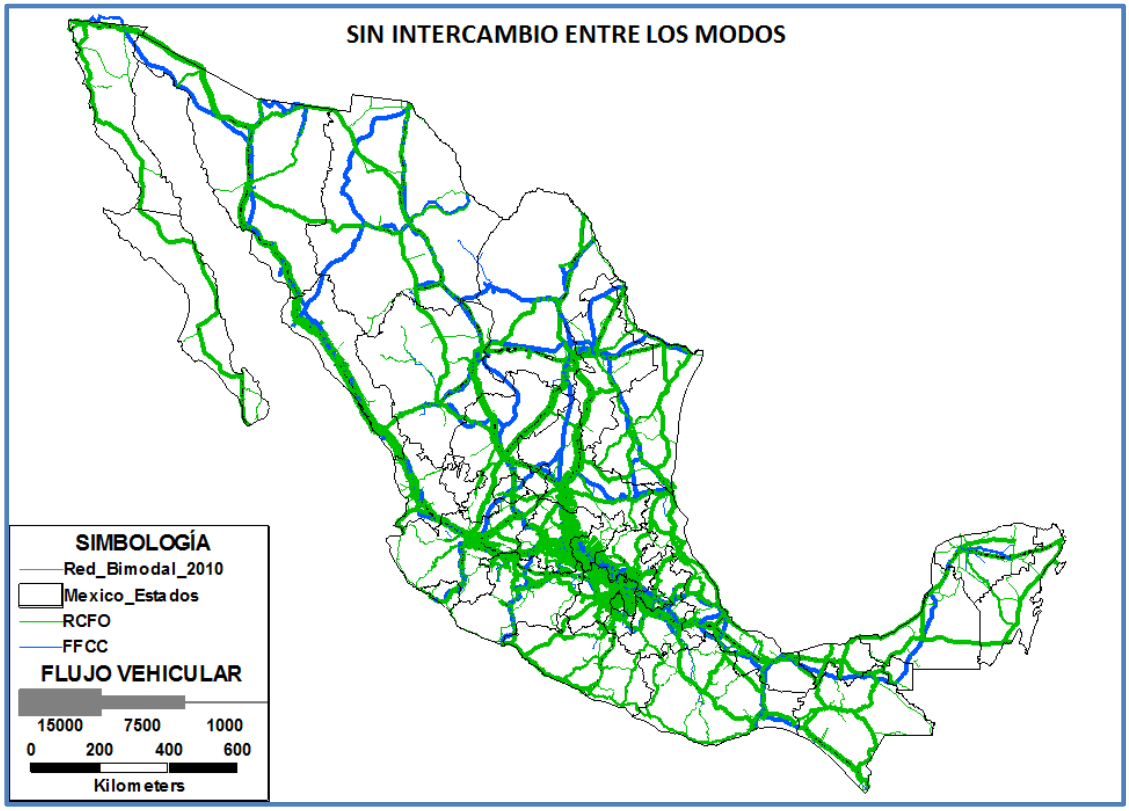


Figura 4.3. Asignación de vehículos automotores y carros de ferrocarril, en la red bimodal, sin transferencia de carga, con equilibrio del usuario en carretera y todo o nada en ferrocarril (elaboración propia).

Finalmente, el modelado cambió restricciones para permitir la transferencia de carga entre los modos, con lo que se obtuvo el pronóstico de flujos que se ve en la figura 4.4.

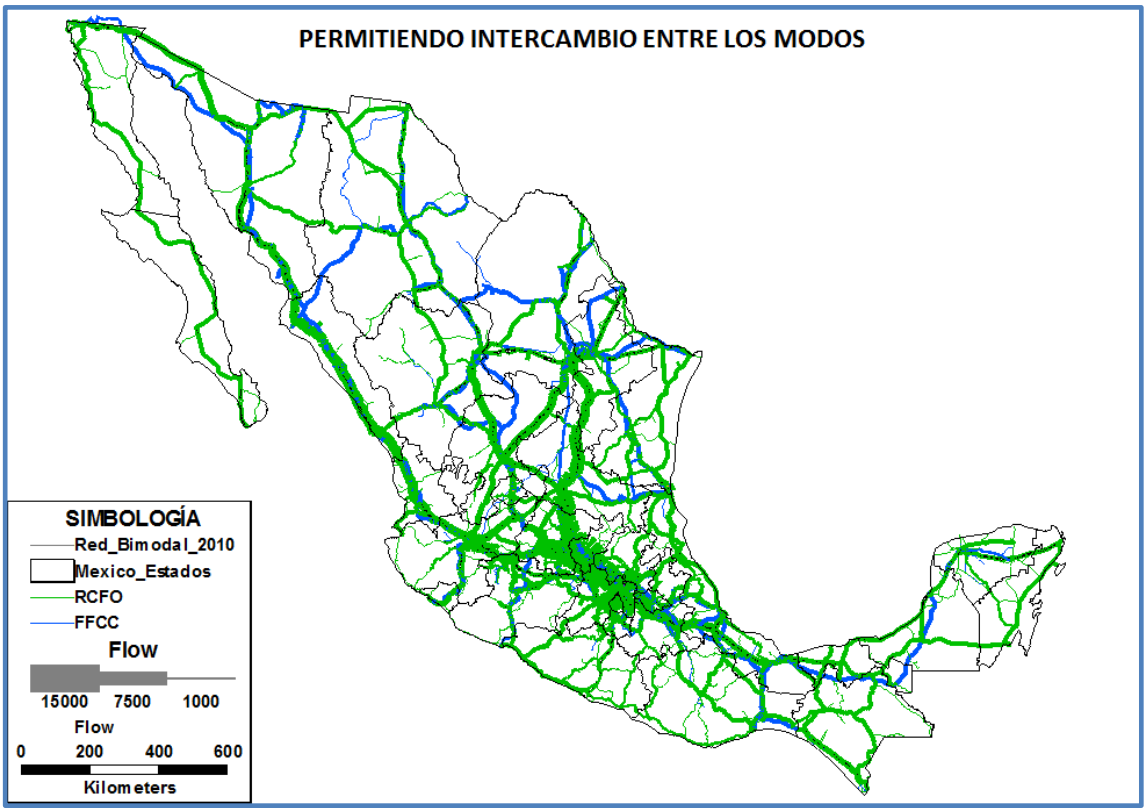


Figura 4.4. Asignación de vehículos automotores y carros de ferrocarril, en la red bimodal, permitiendo transferir carga, con equilibrio del usuario en carretera y todo o nada en ferrocarril (elaboración propia).

Al permitir el libre intercambio de carga entre los modos, se observó un decremento en los volúmenes por ferrocarril en los siguientes tramos:

- Cd. Juárez – Nuevo Casas Grandes – Madera
- Gómez Palacio – Hipólito
- Tamuín – Cd. Mante
- San Luis Potosí – Vanegas

La figura 4.5 muestra las diferencias de flujo en un acercamiento del mapa para los movimientos hacia Ciudad Juárez, donde se aprecia la reducción de flujo ferroviario en la línea azul para la asignación en la que se permitió la transferencia de carga entre los modos.

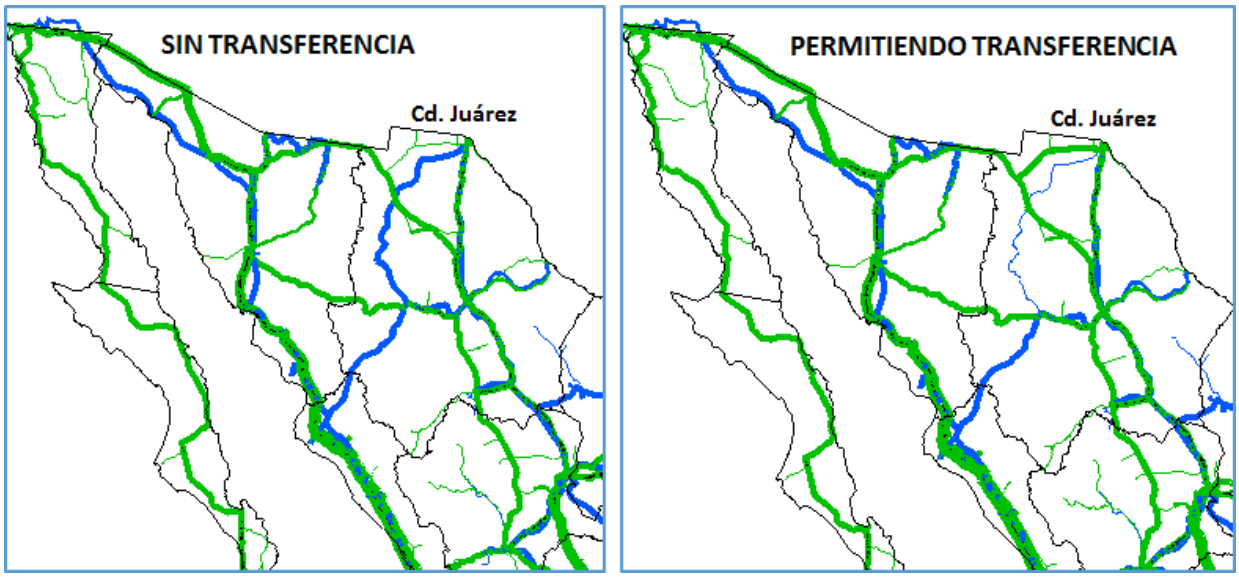


Figura 4.5. Cambios en los flujos vehiculares hacia Ciudad Juárez en la red bimodal (elaboración propia).

Los resultados del modelo indicaron un promedio diario de 121.63 carros de ferrocarril equivalentes que pasan carga de la carretera al ferrocarril, en las 43 estaciones intermodales consideradas. Las cinco terminales intermodales con el mayor intercambio de carros de ferrocarril a carretera son las siguientes:

- Terminal Intermodal Maclovio Herrera
- Ferrotolvas, S.A. de C.V.
- Terminal Intermodal de Pantaco
- Servicios Integrales y Especializados de Coahuila, SAPI de C.V.
- Terminal de Trasvase Cuautitlán

Por otro lado, el modelo muestra un promedio diario de 121.63 carros de ferrocarril que pasan carga del ferrocarril hacia la carretera, desde dentro de las 43 estaciones intermodales consideradas.

Las cinco terminales intermodales con el mayor intercambio de carros de ferrocarril a carretera son las siguientes:

- Terminal Intermodal Maclovio Herrera
- Ferrotolvas, S.A. de C.V.
- Terminal Intermodal Manzanillo
- Servicios Integrales y Especializados de Coahuila, SAPI de C.V.
- Almacenes y Maniobras Integrales del Golfo, S.A. de C.V.

La reducción observada en los flujos vehiculares ferroviarios que pronostica el modelo resulta del criterio de asignación, el cual solamente considera los tiempos de recorrido en las distintas rutas, aun cuando se modela la congestión carretera con la función BPR ya descrita.

En formulaciones posteriores del modelo, una vez que se tengan disponibles los costos de operación en ambos modos, las asignaciones resultantes seguramente serán distintas y permitirán evaluar con mayor precisión las posibilidades reales de transferir carga del autotransporte hacia el ferrocarril.

5 Conclusiones y trabajo futuro

El presente trabajo es una continuación del modelo desarrollado en la primera etapa del proyecto (Moreno E., Rico O., Bustos A., Martner C. y Montoya R. (2014), en el cual se caracterizaron los elementos básicos para el modelado del reparto modal:

a) Una red bimodal que representa conjuntamente la red de carreteras federales y la red ferroviaria.

b) Matrices O-D tanto para el transporte de carga carretero como para el ferroviario.

c) Especificaciones de parámetros α y β para la función de impedancia BPR a utilizar en la red carretera, a fin de representar el congestionamiento vial y modelar la transferencia de carga entre modos.

En el proceso de revisión y diagnóstico de los resultados del modelo se ajustó la primera matriz OD del modo carretero (matriz semilla) utilizando el método de Nielsen (1998) que se encuentra disponible en el software TransCAD. Con ello se logró una mejor estimación de la matriz O-D, la cual puede considerarse la base de modelación de los siguientes ejercicios de asignación.

Cabe señalar que la literatura en la materia indica que, para lograr un uso exitoso del método de Nielsen, se requiere tener suposiciones razonables en el procedimiento de asignación (Caliper, 2013); esto implícitamente califica la caracterización de la función de impedancia BPR que fue utilizada como razonable, aun cuando eso no significa que no pueda mejorarse dicha caracterización.

La revisión de la situación que guarda el reparto modal carretera-ferrocarril en otros países muestra un marco de referencia general para posibles comparaciones de los resultados de modelación futuros, y los ejercicios de asignación mostrados en el capítulo 4 ya dan una primera idea de la conformación de estos repartos modales en México que son una referencia para las tareas de modelación ulteriores.

La experiencia de modelación de este trabajo ha permitido identificar líneas de trabajo futuro, que tienen que ver con el refinamiento del modelo y la mejora de sus estimaciones, las cuales se indican a continuación.

Comparación de flujos estimados con observados

La comparación de los flujos estimados por el modelo con los flujos observados en conteos del TDPA se basaron fundamentalmente en un ajuste a la recta Y = X, en la cual se espera tener una pendiente unitaria y un coeficiente de determinación R^2 razonablemente cercano a uno, lo cual indica que las estimaciones del modelo se encuentran razonablemente cercanas a las observaciones de tráfico con las que se compara.

Sin embargo, estas comparaciones de los flujos modelados pueden ser poco convenientes cuando en una red de transporte hay tramos con flujos muy intensos —como ocurre en autopistas troncales—, y tramos con flujos escasos, como en las vías urbanas que alimentan las autopistas.

El problema es que si se toma como referencia solamente el error absoluto (valor absoluto de la diferencia entre estimado y observado), el mismo valor puede ser muy significativo para unos casos e insignificante para otros (Ortúzar and Willumsen, 2011).

Para sortear estas dificultades en el uso de comparaciones directas de los flujos, se utiliza el indicador GEH (Ortúzar y Willumsen, 2011). Este indicador, aun cuando en algunos textos se señala como *el estadístico GEH*, realmente no corresponde a una prueba estadística formal de alguna hipótesis, sino más bien es una fórmula empírica desarrollada por Geoffrey E. Havers, cuando trabajaba como planificador del transporte en Londres en la década de los años 1970 (Ortúzar and Willumsen, 2011). El indicador GEH se define como sigue.

$$GEH = \sqrt{\frac{2\left(O_j - E_j\right)^2}{\left(O_j + E_j\right)}}$$

donde O_j y E_j son los flujos observado y estimado, respectivamente, en el tramo *j* de la red. El indicador GEH se utiliza ampliamente en la modelación de asignación de flujos y es menos sensible a las dificultades de comparar flujos en redes que tienen tramos con valores muy altos y otros con valores bajos.

Valores del indicador GEH menores a 5.0 se consideran aceptables, según recomendación del *Design Manual for Roads and Bridges (DMRB)*, publicado por la agencia de carreteras británica (DfT-Highway Agency, 2015). Las recomendaciones prácticas sugieren que un buen modelado de asignación debe tener, a grandes rasgos, entre el 60 y 85% de los volúmenes estimados con valores GEH menores a 5.0.

Para valores de GEH entre 5.0 y 10.0, se recomienda revisar el proceso de modelación para detectar posibles fallas; para valores GEH mayores a 10.0, se tiene una alta probabilidad de que el modelado tenga fallas en el modelo mismo, en los datos de entrada o en ambos (Ortúzar y Willumsen, 2011; DfT-Highway Agency, 2015).

Debido a que el indicador GEH no es adimensional, los valores referidos son válidos únicamente para flujos horarios, pues el uso de flujos calculados o medidos en periodos de tiempo más extensos, resultarán con valores del indicador con mayor aceptabilidad (Ortúzar and WIllumsen, 2011). En la tabla siguiente se ejemplifican cálculos entre flujos observados y estimados, con el error absoluto, el error porcentual y el indicador GEH.

Comparación de errores para flujos observados vs estimados (elaboración propia)

Observado (veh/h)	Estimado (veh/h)	Error Absoluto (veh/h)	% Error	Indicador GEH
100	50	50	-50.0%	**5.77**
50	100	50	100.0%	**5.77**
100	110	10	10.0%	0.98
6000	6600	600	10.0%	**7.56**
6000	6300	300	5.0%	3.83
6000	6180	180	3.0%	2.31

De la tabla se observa en el primer renglón un error del -50% en la estimación, que corresponde a 50 veh/h, y dado el flujo observado de 100 veh/h, es un error importante; el valor GEH es 5.77. Del mismo modo, en el segundo ejemplo se tiene el mismo error absoluto del caso anterior, pero el error porcentual es del 100%, y el indicador GEH sigue en 5.77.

En el tercer renglón, se observa un error del 10% en exceso del flujo observado de 100 veh/h, correspondiente a un error absoluto de 10 veh/h, que no es notable, y se tiene el indicador GEH igual a 0.98.

En el cuarto renglón, se tiene el mismo error porcentual del tercer renglón (de 10%), pero en un flujo observado de 6000 veh/h. El error absoluto es de 600 veh/h, que ya es notable, y el indicador GEH sube a 7.56.

De este modo, el indicador GEH señala los casos que requieren revisión en el modelado de asignación de una manera más adecuada que la que ofrecen las mediciones de errores porcentuales, errores absolutos o las gráficas comparativas.

Comparaciones con flujos en la frontera México-EE. UU.

Entre los resultados del modelo de asignación se encuentran estimaciones de flujos de carga con destino en puntos de la frontera norte, tanto para autotransporte como para ferrocarril. Los flujos de carga en la frontera norte de

México son de particular interés para la planeación del transporte de carga por parte de la SCT y el propio IMT.

Si bien datos de TDPA sirven para comparar los flujos carreteros, no se tiene una fuente semejante de datos para el caso ferroviario. Una alternativa a considerar es comparar los flujos pronosticados por el modelo con la información de flujos fronterizos que publica el servicio de Datos sobre Carga Transfronteriza de América del Norte (*North American Transborder Freight Data*, NATFD), de la Oficina de Estadística de Transportación (*Bureau of Transport Statistics* norteamericano.

El servicio NATFD proporciona información de los pesos y valores de las cargas que circulan por los puertos fronterizos. La información de valores se tiene tanto para entradas a Estados Unidos ("imports") como para movimientos hacia México ("exports"). La información del valor de la carga existe para todos los movimientos, pero la de peso de la carga existe solamente para los movimientos que entran a los Estados Unidos. En el sitio Web del NATFD se pueden hacer consultas diversas indicando los destinos de las cargas, los puertos de entrada/salida, el año o los meses de interés para movimiento tanto de camiones como de ferrocarril.

Por esta última característica, los flujos de carga estimados mediante el modelo de reparto modal —ya sea entrando o saliendo de puntos en la frontera norte— no pueden compararse directamente con la información del NATBD. Sin embargo, la información de entradas de carga a Estados Unidos (clasificada como "Imports" en el NATBD) puede examinarse con correlaciones o comparando órdenes de magnitud, a fin de verificar la congruencia de los flujos pronosticados.

De igual modo, la carga que sale de puntos fronterizos con Estados Unidos puede examinarse comparándola con los flujos que el modelo de reparto modal pronostica saliendo de dichos puntos. La información de movimientos de carga que van de México a destinos en Estados Unidos reportada por el NATBD en los puntos fronterizos más importantes en el periodo 2010-2013 se describe a continuación.

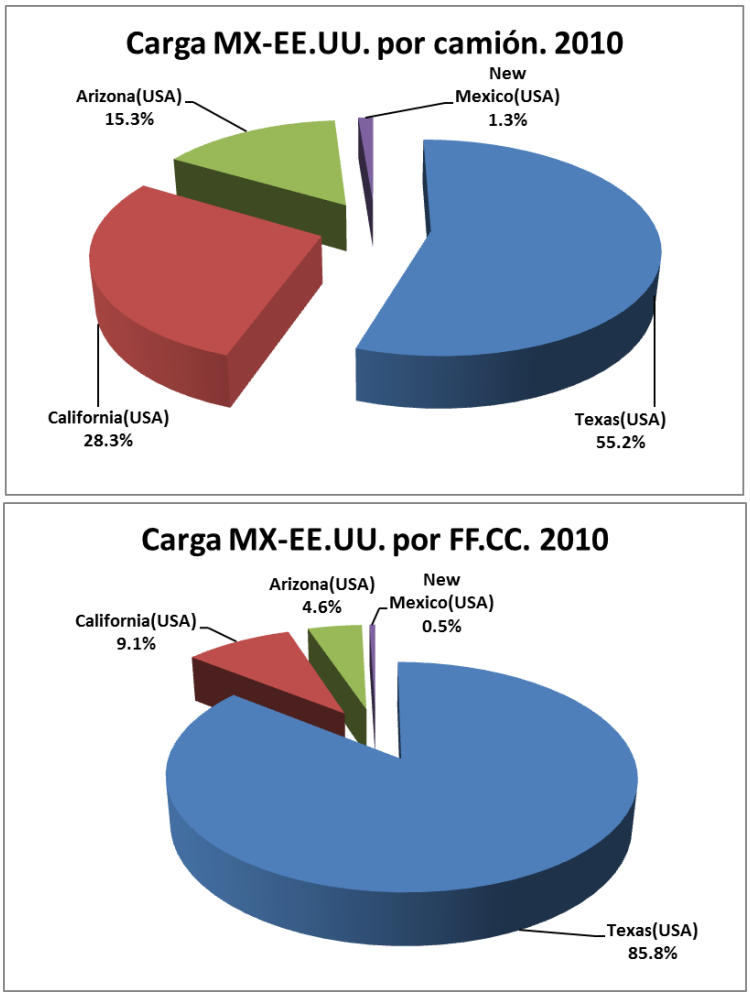
La siguiente tabla muestra datos globales de movimientos de carga por camión y por ferrocarril de los años 2010 a 2013.

Movimientos de carga México-EE. UU. hacia estados fronterizos (BTS, 2015)

		FLUJOS DE CARGA MÉXICO A EE. UU. (miles de tons)				
Tipo de movimiento y modo	**Destinatario**	**Socio**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**
Flujos MX-EUA. Camión	Texas(EUA)	MÉXICO	10251	11334	11939	12707
	California(EUA)	MÉXICO	5257	5613	5770	5993
	Arizona(EUA)	MÉXICO	2834	2671	2908	2947
	Nuevo México(EUA)	MÉXICO	235	229	256	247
Flujos MX-EUA Ferroviario	Texas(EUA)	MÉXICO	2656	2876	2138	2437
	California(EUA)	MÉXICO	283	405	436	696
	Arizona(EUA)	MÉXICO	143	293	334	492
	Nuevo México(EUA)	MÉXICO	15	17	53	58

La tabla indica las toneladas totales anuales que salieron de México a estados fronterizos estadounidenses; no da el detalle de los puntos de cruce.

Sin embargo, lo primero que puede notarse es que la mayor parte de la carga va hacia Texas, seguida de California y en menor grado Arizona, tanto por camión como por ferrocarril. La siguiente figura muestra el reparto porcentual de los totales de carga por camión y por ferrocarril para el año 2010.



Carga México-EE. UU. por camión y por ferrocarril, 2010 (BTS, 2015)

En la sección de metadatos del servicio NATFD, se explica que el registro de los puertos de entrada o salida identifica el puerto donde se llena la documentación de la carga y se pagan los derechos, y que no siempre coincide con el puerto donde físicamente ocurre el movimiento de carga.

Pese a esta limitante, la información del NAFTD respecto de los movimientos registrados en los puertos de entrada en Texas, California, Arizona y Nuevo México da una idea del nivel de los flujos que realmente cruzan en esos puntos.

La tabla enseguida muestra el resumen anual 2010-2013 de los puertos de entrada a Estados Unidos para flujos que llegan desde México.

Carga por camión y por f. c. registrada en puertos fronterizos (BTS, 2015)

Weight (in Thousands of Metric Tons)								
Trade Type and Mode	**Trader**	**Partner**	**Port/District**	**Port/District Description**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2304	Laredo - Texas	11879	13573	14381	14237
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2305	Hidalgo - Texas	3861	3721	3942	4239
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2402	El Paso - Texas	2611	2608	2580	2604
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2301	Brownsville - Texas	929	987	1036	1019
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2303	Eagle Pass - Texas	634	792	874	893
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2307	Rio Grande City - Texas	276	356	466	436
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2309	Progresso - Texas	254	246	297	361
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2302	Del Rio - Texas	245	280	273	260
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2403	Presidio - Texas	65	66	79	48
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2310	Roma - Texas	2	2	3	1
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	5301	Houston - Texas	1	1	1	1
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	5501	Dallas/Ft. Worth Airport -	1	3	5	3
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2408	Santa Teresa - New Mexic	483	684	541	584
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2406	Columbus - New Mexico	120	131	137	153
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2407	Albuquerque - New Mexi	0	0	0	0
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2506	Otay Mesa - California	3258	3406	3585	3812
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2507	Calexico-East - California	1470	1600	1575	1676
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2505	Tecate - California	240	202	69	74
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2704	Los Angeles - California	5	4	4	4
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2501	San Diego - California	0	0	0	0
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2720	Los Angeles International	0	0	0	0
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2801	San Francisco Internationa	0	0	0	0
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2604	Nogales - Arizona	3197	3080	3378	3459
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2608	San Luis - Arizona	168	172	184	176
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2601	Douglas - Arizona	128	154	139	136
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2603	Naco - Arizona	2	4	6	7
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2605	Phoenix - Arizona	1	0	0	1
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2602	Lukeville - Arizona	0	0	0	1
Imports Weight by Truck	USA	MEXICO	2609	Tucson - Arizona	0	0	0	0
Imports Weight by Rail	USA	MEXICO	2303	Eagle Pass - Texas	3345	3977	3999	4175
Imports Weight by Rail	USA	MEXICO	2304	Laredo - Texas	2544	2978	3010	3592
Imports Weight by Rail	USA	MEXICO	2402	El Paso - Texas	1619	1242	1205	1325
Imports Weight by Rail	USA	MEXICO	2301	Brownsville - Texas	634	695	405	657
Imports Weight by Rail	USA	MEXICO	2302	Del Rio - Texas	0	0	0	0
Imports Weight by Rail	USA	MEXICO	2305	Hidalgo - Texas	0	0	0	0
Imports Weight by Rail	USA	MEXICO	2507	Calexico-East - California	38	55	51	35
Imports Weight by Rail	USA	MEXICO	2503	Calexico - California	0	0	0	0
Imports Weight by Rail	USA	MEXICO	2504	San Ysidro - California	0	0	0	0
Imports Weight by Rail	USA	MEXICO	2505	Tecate - California	0	0	0	0
Imports Weight by Rail	USA	MEXICO	2704	Los Angeles - California	0	0	0	0
Imports Weight by Rail	USA	MEXICO	2604	Nogales - Arizona	1176	1250	1108	1460
Imports Weight by Rail	USA	MEXICO	2601	Douglas - Arizona	0	0	0	0
Imports Weight by Rail	USA	MEXICO	2603	Naco - Arizona	0	0	0	0

La anterior confirma la importancia de los estados fronterizos estadounidenses en los movimientos que salen desde México: Texas es el más importante seguido de California y Arizona tanto en flujos por camión como en flujos por ferrocarril.

Para Texas, los puertos con los mayores registros de tonelaje son: Laredo, Hidalgo y El Paso para camiones; para ferrocarril, Eagle Pass, Laredo y El Paso. Para California, los puertos más relevantes son Mesa de Otay y Calexico para camiones y para ferrocarril solamente Calexico. Para Arizona, el puerto más importante es Nogales, tanto para camiones como para ferrocarril.

La información mostrada, si bien no coincide plenamente con los movimientos de carga que salen de México a Estados Unidos, da una idea general de la magnitud de estos movimientos.

Consideraciones de modelado

Finalmente, algunas consideraciones más sobre modelado que se pueden abordar en trabajos futuros comprenden las siguientes tareas:

d) Realizar varios análisis de sensibilidad sobre los parámetros α y β de las funciones BPR propuestas para modelar el sistema carretero federal, a fin de detectar rangos de variación de estos parámetros que conserven la consistencia de las estimaciones de flujos.

e) Abordar el problema de la actualización de las matrices OD utilizadas, para generar estimaciones de matrices para años posteriores a 2010, que es el año base del modelo construido en la primera etapa.

f) Ensayar la combinación de las funciones de impedancia BPR con funciones de tipo Cónica, para seguir las recomendaciones de la literatura (Spiess, 1990) al tratar resultados de estimaciones de flujos en ejercicios de asignación que producen flujos estimados que exceden las capacidades de algunos tramos.

Estas líneas de trabajo futuro pueden partir del modelo revisado que se reporta en este trabajo y continuar el refinamiento y mejoramiento de los flujos estimados siguiendo la metodología expuesta.

De esta manera se estará en posición de calcular los flujos estimados bajo diversos escenarios que sean de interés para las tareas de planeación del transporte terrestre de carga, lo que a su vez será sin duda una contribución útil al diseño de políticas de transporte en este subsector.

Bibliografía

BTS (2012), “Transportation Statistics Annual Report 2012”, Bureau of Transport Statistics [Oficina de Estadística de Transportación de Estados Unidos]; disponible en: www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/publications/transportation_statistics_annual_report/2012/index.html.

BTS (2014), *Freight Facts and Figures 2013*, Bureau of Transport Statistics [Oficina de Estadística de Transportación de Estados Unidos]; disponible en: www.ops.fhwa.dot.gov/freight/freight_analysis/nat_freight_stats/docs/13factsfigures/pdfs/fff2013_highres.pdf.

BTS (2015), “North American Transborder Freight Data: Main Search Page”, Bureau of Transport Statistics [Oficina de Estadística de Transportación de Estados Unidos]; disponible en: http://transborder.bts.gov/programs/international/transborder/TBDR_QA.html.

Caliper Corporation (2005), *Travel Demand Modeling with TransCAD 4.8*, Caliper Corporation, Estados Unidos.

Caliper Corporation (2013), *Travel Demand Modeling with TransCAD 6.0*. *User’s Guide.*

DfT (2015), *Design Manual for Roads and Bridges,* Department for Transport Highways Agency [Dirección General de Carreteras del Departamento de Transporte de Gran Bretaña], en: “Traffic Appraisal of Road Schemes”, vol. 12, en: www.standardsforhighways.co.uk/dmrb.

DTO (2009), “DTO Model Calibration; Highway and PT Assignment Model; Calibration and Validation Report”, Steer Davis Gleave, Dublin Transportation Office [Oficina de Transporte de Dublín], Dublín, Irlanda.

CE (2015), Eurostat Statistics Explained; *Freight Transport Statistics - Modal Split*; Comisión Europea; disponible en: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/extensions/EurostatPDFGenerator/getfile.php?file=148.243.51.170_1425494164_66.pdf.

CE (2015), “EU transport in figures; Statistical Pocketbook 2014, Comisión Europea, en: http://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2014_en.htm.

AEMA (2015), "Freight modal split between road and rail", Agencia Europea de Medio Ambiente; disponible en: www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/road-transports-market-share-increases-3.

Larsson, M. (2009), “Major Trends in Modal Split; Passenger and Freight Transport; EU and North Sea Regions; North Sea Commission; disponible en: www.northseacommission.info/component/docman/doc_download/177-report-major-trends-in-modal-split.html.

Moreno E., O. Rico, A. Bustos, C. Martner y R. Montoya (2014), *Reparto modal óptimo del transporte terrestre de carga en México; primera etapa*, publicación técnica núm. 413, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.

Moreno E., O. Rico y A. Bustos (2014), *Funciones volumen-demora en la modelación de flujos vehiculares*, publicación técnica núm. 427, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.

NCHRP (1998), “Travel Estimation Techniques for Urban Planning”, informe núm. 365, Transportation Research Board [Consejo de Investigación de Transporte], Washington, D.C.

Nielsen, O. A. (1998), “Two New Methods for Estimating Trip Matrices from Traffic Counts”, en: *Travel Behaviour Research: Updating the State of Play*, p. 221-250, J. Ortúzar, D. Hensher y S. Jara Díaz, eds. Pergamon Press.

Ortúzar, J. D. y L. Willumsen (2011), *Modelling Transport*, 4ª ed., John Wiley, Chichester, Unido.

Papacostas, C. S. (1987), *Fundamentals of Transportation Engineering,* Prentice-Hall Inc., Estados Unidos.

Sheffi, Y. (1985), *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-Hall Inc., Nueva Jersey, Estados Unidos.

Spiess, Heinz (1990), “Conical Volume-Delay Functions”, nota técnica en: *Transportation Science* núm. 24 (2), p. 153-158.

Transport Canada (2014a), “Transportation in Canada 2013”, informe sintético, ministerio de Transporte de Canadá, en: www.tc.gc.ca/eng/policy/anre-menu.htm.

Transport Canada (2014b), “Transportation in Canada 2013” apéndice estadístico, ministerio de Transporte de Canadá, en: www.tc.gc.ca/eng/policy/anre-menu.htm.

TRB (2000), *Highway Capacity Manual 2000*, National Research Council Transportation Research Board [Consejo de Investigación de Transporte del Consejo Nacional de Investigación], Washington, D.C.

DDS (2015), *Modal Split of Freight Transport*, División de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas; disponible en: www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/methodology_sheets/consumption_production/modal_split_freight_transport.pdf.

DOE (2013), *Freight Transportation Modal Shares: Scenarios for a Low-Carbon Future*, US Department of Energy [Departamento de Energía de Estados Unidos], preparado por Cambridge Systematics; disponible en: www.nrel.gov/docs/fy13osti/55636.pdf.

Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

http://www.imt.mx/